

Visuell evozierte Potentiale und ihre Topographie beim Lernen japanischer Symbole unter Geruchseinflüssen

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

des Fachbereichs Medizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Benjamin Würzer

aus Ludwigshafen am Rhein

Gießen, 2013

Aus dem Physiologischen Institut der Justus-Liebig-Universität Gießen

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Rainer Schulz

Betreuer: Prof. Dr. Wolfgang Skrandies

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Skrandies

2. Gutachter: Frau Prof. Dr. Carolina Ganß

Tag der Disputation: 21.10.2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Einleitung	1
Gerüche – unsichtbare Leitfäden durch die Welt.....	1
Fragestellung.....	2
Kontextabhängiges Lernen	2
Einführung in die Thematik.....	2
Gerüche als Kontextfaktor	4
Einige Einflussfaktoren auf die Kontexteffekte.....	5
Das olfaktorische System	8
Funktion	8
Anatomischer Aufbau	10
Relevante corticale Anteile des visuellen Systems.....	13
Elektrophysiologische Aspekte	14
Grundlagen evozierter Potentiale	14
Evozierte Potentiale bei Wortverarbeitung und Lernen.....	22
Einfluss von Gerüchen auf elektrophysiologische Parameter	26
Zielsetzung	28
Methoden	29
Gemeinsame Elemente beider Versuchsteile	29
Anwendung der Gerüche.....	29
Stimuli: Japanische Kanji-Schriftzeichen	33
Der Vorversuch – ein reines Verhaltensexperiment	34
Versuchspersonen im Vorversuch.....	34
Versuchsablauf	36
Der Hauptversuch (evozierte Potentiale).....	37
Versuchspersonen	38
Versuchsablauf	40
Messung evozierter Potentiale	44
Auswertung	49

Ergebnisse	52
Verhaltensebene.....	52
Lernen.....	52
Subjektive Evaluation der Gerüche	53
Sind bestimmte Symbole besser zu lernen, als andere?	54
Elektrophysiologie.....	55
Potentialkarten und Beschreibung.....	55
Definition der Komponenten evozierter Hirnaktivität mittels GFP.....	60
Analyse der Komponenten	61
Übersicht.....	73
Diskussion.....	74
Verhalten	74
Kontextabhängiges Lernen mit Gerüchen	74
Einfluss anderer Faktoren	76
Elektrophysiologie.....	76
Symbole erzeugen eine P100-artige Komponente.....	77
Lerneffekte	78
Effekte des „Zeitpunktes“ – Zeichen der Ermüdung?.....	81
Der Einfluss von Gerüchen.....	86
Effekt des „Stimulustypen“	91
Schlussfolgerung	92
Zusammenfassung.....	93
Abstract (English)	96
Short abstract for databases (English)	98
Abkürzungsverzeichnis.....	99
Darstellungs-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	99
Literaturverzeichnis	102
Anhang.....	114
Zusätzliche Abbildungen und Tabellen	114
Verhalten.....	114
Elektrophysiologie	116

Fragebögen	123
Kanji-Zeichen.....	124
Versuchspersonen.....	126
Publikationsverzeichnis	129
Ehrenwörtliche Erklärung	130
Danksagungen	131
Interessenskonflikte.....	131
Tabellarischer Lebenslauf	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Einleitung

Gerüche – unsichtbare Leitfäden durch die Welt

Im Zeitalter von Deodorants, Duschen und Dauerepilation übt der Mensch vermeintlich maximale Kontrolle über seinen Körpergeruch aus und glaubt hierbei auch noch in seiner vermeintlichen Weisheit, diese Einflussnahmen auf die Natur seien von Vorteil.

Wie durch die Evolution bedingt, dient der Geruchssinn aber im gesamten Tierreich der Erkennung von Nahrung, Beute und Feinden, aber auch dem Finden geeigneter Sexualpartner (Price, 1990; Firestein, 2001). Auch der moderne Mensch hängt sehr von seinem Geruchssinn ab, da er in unserer Welt mit Tausenden von Geruchseindrücken konfrontiert wird. Allerdings wird dieser Faktor oft ignoriert oder zumindest nicht bewusst wahrgenommen. Dabei beeinflussen Gerüche heute immer noch vielfältig unser Handeln.

Zum einen erfüllt das Riechen bei der menschlichen Reproduktion immer noch eine wichtige Funktion. Ein Beispiel ist die Wahl eines passenden Sexualpartners. Auch wenn man meinen möchte, dass doch vor allem die medial suggerierten Idealbilder biologisch steriler Schönheitsidole zu einer eher optisch oder sozial-finanziell motivierten Partnerwahl führen würden, haben auch „primitive“ Sinne offenbar immer noch einen Einfluss (Bhutta, 2007). Außerdem beeinflussen die Sekrete weiblicher Achselhöhlen die Synchronizität des weiblichen Zyklus innerhalb einer Gruppe von Frauen (Preti et al., 1986; Bhutta, 2007).

Zum anderen sind es vor allem alltägliche Dinge, die durch den funktionierenden Geruchssinn erleichtert oder möglich werden. Der Genuss von Nahrungsmitteln beispielsweise hängt wesentlich von dieser Sinnesqualität ab, weil Geschmack und Geruch hier eine gemeinsame Rolle spielen (Hatt, 2005; Hiessl, 2010). Ebenso ist das Erkennen von Gefahren wie verdorbener Speisen oder Bränden vor allem durch den Einsatz des Riechorgans möglich und kann bei einer Störung desselben erheblich beeinträchtigt sein (Hüttenbrink et al., 2013)

Der menschliche Geruchssinn ist also keineswegs unnötig geworden, sondern lediglich unterschätzt und weniger beachtet als die Sinnesqualitäten Sehen und Hören.

Fragestellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es erstens, den Effekt des Erlernens der Bedeutung von japanischen Symbolen auf die durch diese Stimuli visuell evozierten Potentiale und deren topographischer Verteilung zu untersuchen. Dies war zuvor bereits in einem ähnlichen Experiment in der Arbeitsgruppe untersucht worden (Skrandies und Shinoda, 2012). Zweitens soll überprüft werden, welchen Einfluss hierauf bestimmte Geruchskonstellationen haben und ob eine Änderung des Umgebungsgeruches von der Lern- zur Testphase zu einer schlechteren Leistung bei der Wiedergabe der Informationen im Sinne von kontextabhängigem Gedächtnis führt. Als dritter Aspekt soll beschrieben werden, welche Einflüsse Gerüche im Allgemeinen auf diese Art evozierter Hirnaktivität haben.

Kontextabhängiges Lernen

Einführung in die Thematik

„...only that can be retrieved that has been stored, and [...] how it can be retrieved depends on how it was stored.“ (Tulving und Thomson, 1973, S. 359)

Kontext-abhängiges Gedächtnis („context-dependent memory“, CDM) bedeutet, dass mit dem Abspeichern eines Inhaltes auch Informationen über den Kontext abgelegt werden. Dieser Kontext ist dann in der Lage den Zugriff auf diesen Gedächtnisinhalt zu ermöglichen oder zu verbessern (siehe Abbildung 1 auf S. 3). Häufig wird als Kontext der räumliche oder zeitliche Zusammenhang eines zweiten oder mehrerer Faktoren mit dem Gedächtnisinhalt bezeichnet (Smith, 1994, S. 168). In Ihrer Metaanalyse stellen Smith und Vela (2001) fest, dass der gewichtete, durchschnittliche Effekt über alle erfassten Studien hinweg einen moderaten aber verlässlichen Einfluss des Kontextes auf die Leistung bei Gedächtnisaufgaben ausübt.

"Context-dependent Memory" hat in der englischsprachigen Literatur zwei Unterkategorien. Zum einen das "state-dependent memory", d.h. das zustandsabhängige Lernen bzw. Gedächtnis im engeren sprachlichen Sinne, und "environmental context-dependent memory", d.h. die Abhängigkeit des Abrufens von Gedächtnisinhalten von der Gleichartigkeit der Umgebung. Nach Eich (1989) (zitiert in Smith, 1994) unterliegen zustands- und umgebungsabhängiges Lernen aber grundlegend dem gleichen internen Mechanismus.

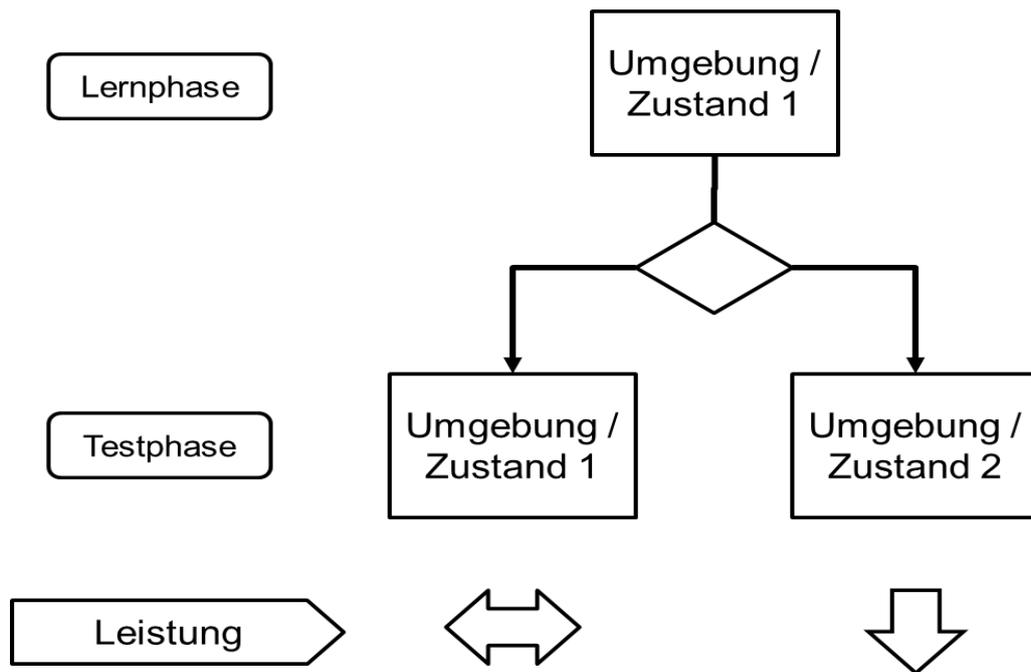


Abbildung 1 – Skizze zur Verdeutlichung des Konzeptes von kontextabhängigem Lernen. Werden Informationen im Zusammenhang mit einem bestimmten „Kontext“, d.h. einer Umgebung oder eines inneren Zustandes, gelernt, so erleichtert dieser Kontext später das Abrufen des Gedächtnisinhaltes. Die Leistung sollte der Theorie entsprechend dann besser sein, als bei einem Wechsel des Kontextes. Siehe auch Smith (1994) und Smith und Vela (2001)

Zustandsabhängiges Gedächtnis

Zustandsabhängiges Lernen („state-dependent memory“) beschreibt, dass die erneute Herbeiführung eines inneren Zustandes - im Experiment oft ein medikamentöser Einfluss - zu einem besseren Ergebnis bei der Prüfung der Lernleistung führt, als ein anderer Zustand (Smith, 1994, S. 176). Smith und Vela (2001) nehmen ferner an, dass interne Zustände, wie zum Beispiel die Laune oder medikamenteninduzierte Zustände schwieriger zu unterdrücken sind als Umgebungsbedingungen.

Ein Beispiel für diese Art des Experimentes liefern Bustamante und et al (1970). Versuchspersonen sollten an Tag 1 gelernte geometrische Figuren an bis zu fünf Folgesitzungen nachzeichnen. Der Abstand zwischen den Sitzungen betrug immer 24 Stunden. Die Autoren verglichen Gruppen mit verschiedenen Kombinationen bzw. Abfolgen der Zuführung von Amobarbital, Amphetamin und Placebo. Es stellte sich hier heraus, dass die Wiedergabeleistung an einem Tag mit "inkongruenter" Bedingung, d.h. an dem statt der Droge das Placebo gereicht wurde (oder umgekehrt), deutlich niedriger war. Wurde wieder zurückgewechselt, sodass die Bedingung bei der Wiedergabe der Bedingung beim Lernen entsprach, so stieg die erreichte Punktzahl wieder an.

Umgebungsabhängiges Gedächtnis¹

Aber auch Paradigmen mit einer Einflussnahme auf die Umgebung einer Versuchsperson sind dafür bekannt, recht robuste und verlässliche Effekte zu erzeugen (Smith, 1994; Smith und Vela, 2001). Sie werden im Englischen auch unter dem Begriff des „environmental reinstatement“ geführt. Godden und Baddeley (1975) beispielsweise untersuchten die Bedingungen „unter Wasser“, d.h. beim Tauchen, und „über Wasser“ gegeneinander. Der Zeitabstand war 1 Tag. Hier zeigte sich ein überraschender kontextabhängiger Effekt. Wurde die Wortliste unter Wasser gelernt, so war sie auch unter Wasser besser erinnerlich als an Land, auch wenn man meinen möchte, dass die Umstände an Land günstiger für die Konzentration sind.

Gerüche als Kontextfaktor

Es gibt auch interessante Arbeiten, die sich direkt mit dem Einfluss von Gerüchen im Zusammenhang mit dem kontextabhängigen Lernen beschäftigen. Einige Autoren sprachen sich durchaus für das Vorhandensein eines solchen Effektes bei Gerüchen aus (Herz, 1997; Pointer und Bond, 1998; Aggleton und Waskett, 1999; Cann und Ross, 1989)

Eine dieser Arbeiten ist von Pointer und Bond (1998), die einen deutlichen Effekt des Geruchskontextes zeigen konnten. Versuchspersonen lernten einen Prosatext, der auf mit Pfefferminzöl parfümiertem, weißem Papier abgedruckt war. Nach einer etwa fünfminütigen Ablenkungsaufgabe sollten die Teilnehmer auf einem neuen Blatt die Geschichte niederschreiben. Jenes war parfümiert oder unparfümiert. Die kontextäquivalente Bedingung (Geruch – Geruch) sorgte gegenüber der „inkongruenten“ Bedingung (Geruch – kein Geruch) für einen statistisch grenzwertigen Effekt bei der Qualität der Wiedergabe (28,7% gg. 36,9%; $p=0,07$). Auf der anderen Seite jedoch erscheint die Bedingung "Geruch bei Lernen und Wiedergabe" (1-1) der anderen überlegen. Der mittlere Anteil dessen, woran sich die betreffenden Versuchspersonen erinnern konnten, d.h. die „Quantität“, lag mit 54,5% ($p=0,01$) deutlich über der Vergleichsgruppe (42,5%) (Pointer und Bond, 1998).

Eine andere Perspektive liefern Morrin und Rathneshwar (2003). In ihrer Studie 1 untersuchten sie zunächst, welchen Einfluss ein zu einem Produkt kongruenter oder inkongruenter Geruch auf die Stimulusbetrachtungszeit, die freie Wiedergabe beteiligter Markennamen nach 24 Stunden, das Wiedererkennen nach 24 Stunden und

¹ Korrekt müsste „environmental-context-dependent Memory“ mit „Umweltkontextabhängiges Gedächtnis“ übersetzt werden. Dies erscheint mir aus sprachlichen Gründen nicht sinnvoll.

die Bewertung des Markennamens hat. Zunächst einmal steigerte die Anwesenheit eines angenehmen Umgebungsgeruches, ob zu einer Produktgruppe passend oder nicht, die Betrachtungszeit der Produktbilder um fast 30%. Dies wird von den Autoren als Hinweis auf die erbrachte Aufmerksamkeit gewertet. Außerdem steigerte sich in beiden geruchsexponierten Gruppen das Gedächtnis für bekannte und unbekannte Markennamen signifikant. Ferner erhöhte sich die Sicherheit der Probanden, mit "Ja" oder "Nein" zu entscheiden, ob ein Produkt überhaupt dargeboten wurde, von 67% auf 80% bzw. 78% ($p < 0,0001$) (Morrin und Rathneshwar, 2003, S. 18).

Im zweiten Teil ihrer Untersuchung beleuchteten Morrin und Rathneshwar (2003) die Frage, ob bezüglich der Wiedererkennung und Benennung von Markennamen der Effekt des zustandsabhängigen Lernens eine Rolle spielt. Hierzu änderten sie den Versuchsaufbau. Jetzt wurde den Versuchspersonen während der Enkodierungsphase entweder kein oder ein zu den Stimuli passender, angenehmer Geruch dargeboten. Gleiches galt für die Wiedergabephase, sodass ein Aufbau mit 2x2 Bedingungen resultierte (0-0, 0-1, 1-0, 1-1) (Morrin und Rathneshwar, 2003, S. 19–21) . Die Ergebnisse bezüglich der Anwesenheit eines Geruches in der Lernphase konnten reproduziert werden.

Für die An- oder Abwesenheit eines Geruches während der Testphase konnte hingegen für beide Ausgangsbedingungen (Geruch oder kein Geruch während des Lernens) kein Effekt nachgewiesen werden. Für den Wechsel des Zustandes von "Geruch" zu "kein Geruch" ist sogar eine leichte, nicht signifikante Tendenz vorhanden, die den Erwartungen widerspricht. Die Ergebnisse von Morrin und Rathneshwar (2003) widersprechen somit der Annahme, es gäbe kontextabhängiges Lernen bei Gerüchen.

Einige Einflussfaktoren auf die Kontexteffekte

Auch wenn allgemein ein Einfluss der Gerüche auf Enkodierung und Abrufen angenommen wird (Aggleton und Waskett, 1999; Smith und Vela, 2001), so sind auch diese Effekte nicht uneingeschränkt robust gegenüber zahlreichen Faktoren und Besonderheiten. Etliche Störfaktoren, die allgemein für kontextabhängiges Lernen gelten, können zu einem Versagen des Experimentes führen:

Der Aufgabentyp, der zum Messen des Lernerfolges genutzt wird, entscheidet unter Umständen darüber, ob der Einfluss schwächerer Kontextfaktoren überhaupt detektiert werden kann. Smith, Glenberg und Bjork (1978) machen deutlich, dass CDM-Effekte für freie Wiedergabe deutlicher sind, als für gestützte Wiedergabe oder gar reines Wiedererkennen. In der freien Wiedergabe benötigt eine Versuchsperson mehr

zusätzliche Gedächtnishilfen, als dies bei einem gestützten Abrufen (z.B. von Begriffen, die mit Symbolen assoziiert sind) der Fall ist. Diese Hilfen bezieht sie dann aus verschiedenen Quellen, von denen eine die Umgebung sein kann. Dennoch kann grundsätzlich auch reines Wiedererkennen durch den Kontext beeinflusst werden (Smith, 1986). In einer späteren Arbeit allerdings (Smith und Vela, 2001) wird dieser Aspekt statistisch nicht signifikant und die Autoren argumentieren, eine präzise Kontrolle zahlreicher Faktoren sei nötig, um die Einflüsse des Aufgabentyps dennoch zu zeigen.

Zwei weitere mögliche Störfaktoren, die den Umgebungseffekt beim Lernen verringern können, sind "Überschatten" und "Überleuchten" (Smith und Vela, 2001, S. 206). Beide haben gemeinsam, dass hierbei die Einflussnahme der tatsächlichen Umgebung auf Speicher- oder Abrufprozesse verringert wird. Überschatten (engl. "overshadowing") beschreibt den Effekt, durch den beim Erlernen eines Gedächtnisinhaltes das zeitgleiche Abspeichern von Kontextinformationen unterdrückt wird. Somit werden Kontexteffekte verringert. Überleuchten (engl. "outshining") hingegen tritt beim Testen auf. Hierbei wird die Umgebung derartig unterdrückt, dass diese weniger dazu genutzt werden kann, um Gedächtnissonden zum leichteren Erinnern zu generieren (Smith und Vela, 2001, S. 206). Verschiedene Techniken haben hierauf Einfluss. Dies geschieht zum Beispiel über starke Assoziationen innerhalb der Elemente einer Liste im Sinne von Überschatten oder das mentale Wiederherstellen der ursprünglichen Lernumgebung (Smith und Vela, 2001).

Einige Arten der kognitiven Verarbeitung begünstigen außerdem besondere interne Assoziationen der Versuchspersonen. Diese fungieren dann selbst als Stütze beim Abruf gespeicherter Informationen, weshalb man weniger auf die externen Faktoren der Umgebung angewiesen ist. Auch hierdurch verringert sich der mögliche Effekt im Sinne eines kontextabhängigen Gedächtnisinhaltes (McDaniel et al., 1989, S. 527). Bei Fernandez und Glenberg (1985) (zitiert in Smith und Vela, 2001, S. 213 und McDaniel et al., 1989) erschien das Wechseln des Raumes nicht ausreichend, um eine messbare Beeinträchtigung des Gedächtnisses zu erzielen. Sie benutzten allerdings zu lesende Sätze, die von der Versuchsperson weiter beurteilt werden sollten. McDaniel et al. (1989) räumen hier die Möglichkeit ein, dass diese erhöhte Beschäftigung mit den zu lernenden Elementen (siehe oben) eine selbst-bezogene Enkodierung zur Folge hatte, welche Umgebungsfaktoren unterdrückte.

Oberflächliche Informationsverarbeitung, die Anzahl der zu lernenden Elemente, sowie ob sie visuell oder akustisch dargeboten werden, scheint nach Smith und Vela (2001)

eher keinen Einfluss auf CDM-Effekte zu haben. Dies widerspricht einer früheren Theorie (Smith, 1986), wonach flaches, oberflächliches Lernen verlässlich durch Umweltfaktoren beeinflusst werden kann, während absichtliches, gezieltes Lernen jedoch, wie z.B. bei Schülern, die für eine Prüfung lernen, als möglicher Antrieb für die Erzeugung interner Gedächtnishilfen gewertet wird und damit nach Smith (1986, auch zitiert in McDaniel et al., 1989) für Kontexteffekte desensibilisierend wirkt. Modrow, Petroff und Bliss (1978) beobachteten in ihrem Experiment zu zustandsabhängigem Lernen mit Ratten ebenfalls einen Effektverlust durch besonders intensives Training.

Ein langes Warteintervall zwischen Lernen und Test ist mit einem signifikant stärkeren Einfluss des Kontext (Smith und Vela, 2001, S. 213). Aggleton und Waskett (1999) fanden überdies heraus, dass auch bei Geschehnissen außerhalb eines Labors über lange Zeit anhaltende CDM-Effekte durch Gerüche zu finden sind.

Eine Untersuchung von Herz (1997) zeigt, dass stärkere Einflüsse des Geruches sich ergeben, wenn er als herausragend wahrgenommen wird. Ein Geruch kann "besonders" sein, weil er einer Person selten begegnet oder weil er zur Gesamtsituation unpassend ist, d.h. er an sich nicht erwartet wird. Dies zeigt sich darin, dass ein herausragender Geruch beim Lernen und Abrufen insgesamt zu besseren Ergebnissen anregt. Besonders gilt dies jedoch, wenn er sowohl unbekannt als auch zur aktuellen Umgebung inkongruent ist. Was den Kontext betrifft, gelang es ihr, einen deutlichen kontextabhängigen Lerneffekt des "besonderen" Geruches nachzuweisen. Ferner konstatiert die Autorin, dass wenig herausragende Gerüche, z.B. der Geruch von Reinigungsmittel, nicht dazu geeignet sind, im Rahmen des Lernens mit enkodiert zu werden. Allerdings konnte sie innerhalb der "besonderen" Gerüche keine weitere Überlegenheit des fremden Geruchs gegenüber dem lediglich zur Situation inkongruenten, aber bekannten Duft darstellen (Herz, 1997). Dies bedeutet auch, dass durch die falsche Auswahl des Geruches ein möglicher CDM-Effekt von vorneherein verhindert wird.

In der Zusammenschau unterliegt kontextabhängiges Lernen zahlreichen Einfluss- und Störfaktoren, die zu kontrollieren eine Herausforderung an die Gestaltung des Experimentes darstellt. Empfindliche Testmethoden sind notwendig, um die durchaus kleinen Effekte der Kontextmodulation zu messen.

Das olfaktorische System

Funktion

Es gibt zwei verschiedene olfaktorische Systeme: Das offene, allgemeine olfaktorische System und das akzessorische, sexualolfaktorische System, welches bei Tieren auch als vomeronasales System bezeichnet wird (Price, 1990; Firestein, 2001, S. 215).

Die meisten geruchsaktiven Stoffe sind aliphatische und aromatische Moleküle mit verschiedenen Kohlenwasserstoffgerüsten und unterschiedlichen funktionellen Gruppen (Firestein, 2001). Die Signaltransduktion, das heißt die Erkennung einer Substanz und die Umwandlung dieser Information in neurale Signale, erfolgt in olfaktorischen Sinneszellen über G-Protein-gekoppelte Rezeptoren und eine klassische Signalkaskade, an der unter anderem eine Adenylatzyklase, zyklisches Adenosinmonophosphat (cAMP) und ein durch zyklische Nukleotide aktivierter Calcium-Ionenkanal („CNG“) beteiligt sind (siehe auch z.B. Firestein, 2001; Lang und Schmidt, 2005 u.v.m.)

Die meisten Geruchsrezeptoren können von mehreren Gerüchen aktiviert werden und umgekehrt können die meisten Gerüche mehr als nur einen Rezeptor ansprechen. Dies hat eine enorme Vielfalt an Kombinations- und Einflussmöglichkeiten zur Folge. Ferner sind Überlegungen im Gange, dass verwandte Molekülstrukturen in der Lage zu sein scheinen, sich gegenseitig von Geruchsrezeptoren zu verdrängen um so im pharmakologischen Sinne als Agonisten und Antagonisten zu wirken (Firestein, 2001, S. 215). Auch wenn theoretisch Milliarden verschiedene Geruchsqualitäten durch die Kombinationsmöglichkeiten der über 1000 verschiedenen olfaktorischen Rezeptortypen detektiert werden könnten, so erscheinen alleine schon durch die physikalischen Eigenschaften der Chemikalien hinsichtlich der Löslichkeit, Flüchtigkeit und Stabilität Grenzen gesetzt (Firestein, 2001, S. 216).

Bleibt ein Individuum längere Zeit ein und demselben Geruch in gleicher Konzentration ausgesetzt, so geht dessen Empfindungsintensität dafür zurück. Diese allgemeine Adaptation ist auch auf zellulärer Ebene nachweisbar. Eine Erklärung für die Adaptation des Sinnesneurons ist eine Veränderung, welche durch den Einstrom von Calciumionen verursacht wird. Wenn die intrazelluläre Calciumkonzentration während der Signaltransduktion ansteigt, so beeinflusst diese - vermutlich über eine Einflussnahme auf das Protein Calmodulin - die Empfindlichkeit des Calcium-Ionenkanals in der Zellmembran für zyklisches Adenosinmonophosphat (cAMP). So adaptiert die Zelle zwar an den Stimulus, bleibt aber für Änderungen der

Stimulussituation empfindlich (Firestein, 2001, S. 214). Individuen können aber auch für einzelne Gerüche grundsätzlich weniger oder gar nicht wahrnehmungsfähig sein (Hüttenbrink et al., 2013).

Erwähnenswert ist auch der Effekt der Kreuzadaptation (Hatt, 2005), welcher am ehesten auf die genannte Affinität der gleichen Rezeptoren für unterschiedliche Stoffe zurückzuführen ist. Hierbei wird die Empfindlichkeit für eine Substanz herabgesetzt, obwohl zuvor eine Exposition gegenüber einer anderen Fragranz stattgefunden hat.

N. trigeminus und N. olfactorius können auch von den gleichen Substanzen, aber mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten erregt werden (Silver und Finger, 1991). Im Alltag erkennen wir dies beispielsweise an der schleimhautreizenden Wirkung von Menthol oder Ammoniak. Man spricht hier von einer trigeminalen Komponente (Hatt, 2005, S. 421). Ein Geruch mit einer stärkeren trigeminalen Komponente unterscheidet sich hinsichtlich seines Einflusses auf psychobiologische Reaktionen von anderen Gerüchen (Michael, 2003).

Subjektive Geruchsqualitäten

Amoore (1952, zitiert in Hatt, 2005) klassifizierte Geruchsklassen, welche mit blumig, ätherisch, moschusartig, kampherartig, faulig, schweißig und stechend benannt wurden. Moderne Basisnoten der Parfümerie hingegen sind blumig, grün, zitronig, farnartig, orientalisch, aldehydisch, tabakartig / lederartig und "Zypern"² (Jellinek, 1992).

Experten versuchen sich heute an neueren Einteilungen, die weniger auf schwer beschreibbare Archetypen, sondern mehr auf dynamische Beschreibungsdimensionen zurückgreifen. Ein Beispiel ist die "Map of the World of Fragrances", bei der die Achsen blumig/nicht-blumig, sowie warm/kalt bzw. leicht/schwer zentrale Einteilungskriterien bilden (Jellinek, 1992, S. 239). Ein anderer Ansatz ist die Bewertung eines Geruches in den Bedeutungsdimensionen "Evaluation", "Stärke" und "Aktivität" durch Probanden, wie in einer Arbeit von Reik und Skrandies (2006) beschrieben.

Es scheint ferner eine Hierarchie zwischen primären und sekundären Gerüchen zu geben, was die experimentelle Verwendung angeht. Primäre Gerüche sind Basisgerüche und einzelne Duftnoten, wie zum Beispiel Zitrone, während sekundäre

² Sic! Im Original „cyprus“ (engl. für Zypern; nach Cop et al. (2003)). Geht auf das Parfüm „Chypre“ (franz. für Zypern) von Francois Coty zurück Wikipedia (2013)

Gerüche als komplexe Zusammenstellungen einzelner Komponenten zu betrachten sind (Castle, van Toller und Milligan, 2000).

Anatomischer Aufbau

Olfaktorisches Epithel und Nerven

Die Riechschleimhaut als geruchswahnehmender Teil der Nasenschleimhaut kleidet beim Menschen lediglich 1-2 cm² der oberen Nasenmuschel aus (Price, 1990; Trepel, 2008). Das mehrreihige Sinnesepithel der Riechschleimhaut ist etwas höher als das normale respiratorische Epithel und unterscheidet sich außerdem von diesem durch das Fehlen von Flimmerhärchen. Im histologischen Präparat kann man drei Reihen von Zellkernen unterscheiden: Die am weitesten luminal gelegenen gehören zu den Stützzellen, die mittleren zu den Sinneszellen und die am weitesten basal erscheinenden Zellkerne zu den Basalzellen. Es ist bemerkenswert, dass letztere mitotisch aktiv sind und Stammzellen zur Regeneration der Sinneszellen darstellen. Deren Lebenszeit beträgt nur ca. 30-60 Tage. Die insgesamt etwa 10 Millionen Sinneszellen haben ein rundliches Soma von dem aus ein Fortsatz in Richtung Nasenlumen reicht, dessen olfaktorische Zilien in den Schleim der Riechschleimhaut hineinragen (Trepel, 2008, S. 371). Die olfaktorischen Sinneszellen sind primäre Sinneszellen. Das heißt, dass sie sowohl die Signaltransduktion als auch die Signalfortleitung in das zentrale Nervensystem übernehmen. Ihre Bauart ist die eines bipolaren Neurons mit einem einzigen Dendriten, der bis zur Oberfläche des Gewebes reicht und dort von einer knopfartigen Struktur etwa 20 feinste, in der Schleimschicht gelegene Zilien ausbildet, die für die Signaltransduktion verantwortlich sind (Firestein, 2001).

Die zentralwärts gerichteten Axone der Riechzellen vereinigen sich zu Bündeln, die hunderte markloser Fasern enthalten und zusammen von einer Schwann'schen Myelinscheide umfasst werden. Diese „Fila olfactoria“, etwa 20 auf jeder Seite des Nasenseptums, sind die eigentlichen Riechnerven. Die Fila olfactoria ziehen durch die Lamina cribrosa des Os ethmoidale, um im Bulbus olfactorius in der vorderen Schädelgrube die ersten Synapsen einzugehen (Bähr, Frotscher und Duus, 2009, S. 131).

Bulbus olfactorius

Im Bulbus olfactorius finden sich unter anderem Mitral-, Büschel-, Körner- und periglomeruläre Zellen (Price, 1990). Dort sind auch histologisch auffällige Strukturen, die etwa 100µm großen Glomeruli zu sehen. Die Fortsätze von Sinneszellen, welche

die selben Rezeptoren exprimieren, enden (meist) im selben Glomerulum (Firestein, 2001). Hier erfolgt auch eine massive Konvergenz von tausenden Nervenfortsätzen auf jeweils nur 5-25 Mitralzellen, die Hauptprojektionsneurone des Bulbus. Die verschiedenen Geruchsqualitäten werden daher topisch getrennt im Bulbus olfactorius verarbeitet. Die periglomeruläre Zellen und die Körnerzellen dienen in erster Linie als Interneurone (Firestein, 2001).

Die Axone von Mitral- und Büschelzellen bilden den Tractus olfactorius (Price, 1990, S. 1201), der an der Unterseite des Frontalhirns liegt. Er zieht auf seinem Weg zu den primären olfaktorischen Rindengebieten in der vorderen Schädelgrube nach kaudal und teilt sich vor der Substantia perforata anterior im Trigonum olfactorium in die Stria olfactoria lateralis und medialis (Bähr, Frotscher und Duus, 2009).

Primärer olfaktorischer Cortex und verbundene Areale

Es bestehen zahlreiche Verbindungen zwischen dem olfaktorischen Cortex und anderen Anteilen des Gehirns. Auf die funktionelle Bedeutung dieser neuroanatomischen Verhältnisse vor dem Hintergrund dieser Arbeit wird später, vor allem aber unter „Rolle des präfrontalen Cortex“, näher eingegangen.

Der primäre olfaktorische Cortex besteht aus Nucleus olfactorius anterior, Tuberculum olfactorium, einigen Anteilen der Amygdala (Ncl. corticalis anterior u. Ncl. amygdaloideum medialis), dem olfaktorischen Anteil des entorhinalen Cortex und der Area piriformis. All diese sind ausufernd miteinander vernetzt, mit Ausnahme des Tuberculum olfactorium, welcher primär nur Verbindungen in das Pallidum unterhält (Price, 1990, S. 1205). Während der Nucleus olfactorius anterior in den Tr. olfactorius eingelagert ist (Trepel, 2008, S. 230; Price, 1990), so entspricht das Tuberculum olfactorium beim Menschen in etwa der Substantia perforata anterior (BrainInfo, 1991-heute). Die übrigen Anteile des primären olfaktorischen Cortex werden über die Fasern des lateralen Stranges erreicht, welcher über den Limen insulae zum Corpus amygdaloideum und den genannten Anteilen des Gyrus parahippocampalis (Area 28)³ zieht (Bähr, Frotscher und Duus, 2009).

Vom olfaktorischen Cortex aus werden die Informationen zum Teil direkt (Price, 1990, S. 1207), aber auch über den Thalamus an den frontobasal gelegenen orbitofrontalen Cortex weitergeleitet (Trepel, 2008, S. 232; Price, 1990). Sowohl die agranuläre Insula als auch der orbitale Cortex erhalten von zahlreichen Arealen sensorische

³ Hier unter Gyrus parahippocampalis („GHP“) zusammengefasst sind Area (pre)piriformis, Area entorhinalis, Presubicum und Gyrus parahippocampalis posterior (BrainInfo, 1991-heute)

Informationen verschiedener Modalitäten, die sie integrieren. Vor allem Geschmacks- und Geruchsinformationen, aber auch somatosensorische und visuelle Afferenzen, konvergieren dort. Im orbitalen Bereich liegt also ein Netzwerk vor, welches an der Verarbeitung und Analyse von Informationen beteiligt ist, die mit Nahrung zu tun haben (Price, 1990, S. 1207; Hiesl, 2010).

Die Riechbahn ist also die einzige sensorische Bahn, die ohne nennenswerte Zwischenschaltung im Thalamus die Hirnrinde erreicht (Bähr, Frotscher und Duus, 2009).

Medialer Strang, Hypothalamus und vegetative Zentren

Die Axone des medialen Stranges enden an den Kernen in der Area septalis (subcallosa), welche unterhalb des Genus corporis callosi sowie vor der Commissura anterior lokalisiert sind. Von hier aus bestehen Verbindungen zur contralateralen Hemisphäre, sowie zum limbischen System (Bähr, Frotscher und Duus, 2009, S. 131b). Ein Teil der Impulse des Systems wird über die Commissura anterior zur contralateralen Hemisphäre geleitet (Trepel, 2008, S. 230b; Price, 1990).

Die von Gerüchen oft erzeugten emotionalen bzw. autonomen Reaktionen entstehen wahrscheinlich über Verbindungen der Riechbahn mit dem Hypothalamus, dem Thalamus und dem limbischen System. Die Area septalis ist u.a. durch Assoziationsfasern mit dem Gyrus cinguli, einem Teil des limbischen Systems verbunden. Die Hauptverbindungen zu den autonomen Gebieten hingegen stellen das mediale Vorderhirnbündel („medial forebrain bundle“) sowie die Striae medullares thalami dar (Bähr, Frotscher und Duus, 2009).

Das mediale Vorderhirnbündel einerseits zieht seitlich durch den Hypothalamus und gibt hier Äste an hypothalamische Kerne ab. Ein Teil der Fasern zieht weiter bis in den Hirnstamm zu vegetativen Zentren in der Formatio reticularis und zu den Nuclei salivatorii sowie dem Nucleus dorsalis nervi vagi (Bähr, Frotscher und Duus, 2009, S. 132). Andererseits zieht die Stria medullaris, die entlang dem Thalamus verläuft, zu den Nuclei habenulares in den Habenulae, welche die olfaktorischen Informationen ebenfalls in den Hirnstamm weiterleiten, wo diese und andere vegetative Hirnnervenkerne aktiviert werden (Trepel, 2008, S. 212). Alleine durch diese anatomischen Verhältnisse sind etliche vegetative Reaktionen auf Gerüche erklärbar.

Lokalisation olfaktorisch evozierter Hirnaktivität

Die mittels evozierter Potentiale erfassbaren Hirnbereiche decken sich größtenteils mit den anatomisch verbundenen Arealen. Eine Untersuchung mittels olfaktorisch

evozierter Potentiale von Lascano et al. (2010) konnte zeigen, dass die ermittelte Aktivität für diese Sinnesqualität vor allem in parahippocampalen, d.h. perirhinal und entorhinalen, Arealen, der Amygdala, der Insula, den Gyri temporalis superior und medius, sowie den Gyri frontalis medius und inferior zu finden ist.

Rolle des präfrontalen Cortex

Der präfrontale Cortex wird eingeteilt in lateralen, orbitalen und medialen PFC. Der laterale präfrontale Cortex (LPFC) unterhält unter anderem Verbindungen mit parietalen und occipitalen, sowie mit inferioren temporalen visuellen Assoziationsgebieten. Ferner bestehen Afferenzen und Efferenzen mit dem orbitofrontalen Cortex (OFC) und dem Gyrus cinguli (Hartikainen und Knight, 2003).

Der LPFC ist unter anderem an Arbeitsgedächtnis- als auch an Aufmerksamkeitsprozessen beteiligt. Hartikainen und Knight (2003) haben Literatur ausgewertet, die dem LPFC eine Rolle bei der frühen, aufmerksamkeitsabhängigen Modulation occipitaler Hirngebiete zuschreiben. Für das visuelle P100 und das folgende negative Potential im Bereich von 100-200 ms konnte ein Einfluss des LPFC beobachtet werden (Mangun, 1995 bzw. Hartikainen und Knight, 2003). Ferner sorgt der LPFC für inhibitorische Kontrolle über irrelevante Stimuli.

Der OFC hat Verbindungen mit dem limbischen System und dem lateralen präfrontalen Cortex (LPFC). Dort (OFC) werden Emotion und Kognition, als auch Motivation und Verhalten integriert (siehe Hartikainen und Knight, 2003 für eine Übersicht, ebenso wie Hiessl, 2010, S. 19). Im elektrophysiologischen Sinne scheint er eine Rolle bei der Unterdrückung von Reaktionen und Potentialen auf unwichtige bzw. häufige Stimuli zu spielen. Ferner vermutet man, er übe, wie auch der LPFC, eine modulierende und inhibierende Funktion auf posteriore Regionen des Gehirns aus (Hartikainen und Knight, 2003). Wie oben ausgeführt empfängt der OFC Informationen zu Teil direkt aus dem olfaktorischen Cortex (Trepel, 2008, S. 232; Price, 1990). Insofern begründet sich die Annahme, olfaktorische Reize könnten Einfluss auf visuell evozierte Potentiale nehmen.

Relevante corticale Anteile des visuellen Systems

Für das Verständnis bestimmter Aspekte der Arbeit wird hier auf bestimmte corticale Verarbeitungsschritte visueller Informationen eingegangen, welche die grundlegende Kenntnis über die Physiologie und Anatomie des visuellen Systems voraussetzen.

Gleich nach der primären visuellen Verarbeitung in der Area striata teilen sich die Projektionswege in zwei Systeme auf. Das erste System, der occipitotemporale Pfad, sorgt in erster Linie für die visuelle Erkennung von Objekten und deren kognitive Assoziation mit anderen Elementen und Bedeutungen. Besonders zentrales Sehen aus dem lateralen Striatum ist für seine Funktionen wichtig. Er verläuft zunächst hierarchisch von V1 (visuelles Areal 1) zu V2 und teilt sich dann zu V3 und V4. Letztere Region projiziert in Bereiche im unteren Temporallappen, von wo aus Verbindungen ins limbische System und zum ventralen Frontallappen bestehen. Das zweite System, der dorsale Pfad, dient vor allem visuell-räumlichen Funktionen, wie zum Beispiel der mentalen Repräsentation räumlicher Karten. Sein Verlauf mit Projektionen von V1 und V2 in das Areal MT [mittleres temporales Gebiet] am caudalen Rand des Sulcus temporalis superior. MT, ein Areal mit wesentlicher Funktion für das Bewegungssehen, ist seinerseits mit nicht exakt umschriebenen Bereichen in Richtung parietal verknüpft. Eine ganz klare Rolle jedoch spielt hier der posteriore parietale Cortex. Auch dieser dorsale Pfad projiziert schlussendlich ins limbische System und in den Frontallappen (Mishkin, Ungerleider und Macko, 1983). Diese komplexen Beschreibungen, die sich vor allem auf Untersuchungen an Affen stützten, ergänzen etablierte Konzepte (Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005, S. 403) von der Verarbeitung komplexer visueller Stimuli außerhalb der striatalen und auch occipitalen Rindengebiete.

Elektrophysiologische Aspekte

Grundlagen evozierter Potentiale

Hirnelektrische Aktivität und ihre Mittelung

Unser Gehirn besteht unter anderem aus einer Unzahl von Nervenzellen, von denen wir wissen, dass sie zur Ausübung ihrer Aktivität und zur Kommunikation untereinander elektrische Gradienten über ihre Zellmembran aufbauen (Fakler und Fahlke, 2005; Dudel und Heckmann, 2005). Somit bedeutet das Betrachten dieser elektrischen Felder auch in gewisser Weise das Betrachten der Tätigkeit dieser Zellen. Die synchrone Aktivierung größerer Populationen an Zellen ruft elektrische Aktivität hervor, welche über Volumenleitung an umliegende Bezirke, so auch die Kopfhaut, vermittelt wird.

Elektrische Hirnaktivität wird also gemessen, indem eben an einzelnen Punkten auf der Kopfhaut Potentialdifferenzen gegen einen Referenzpunkt abgeleitet werden. Dies ist das Prinzip des Elektroencephalogramms (EEG). Findet für jeden Messpunkt die

Erfassung der Daten mehrerer Elektroden statt, so nennen wir dies "Multikanal-EEG". Die Zeit zwischen den Datenpunkten beträgt meist wenige Millisekunden, weshalb diese Methode eine hohe zeitliche Auflösung bietet (Skrandies, 2005). Die räumliche Auflösung wird in erster Linie von der Anzahl der Elektroden bestimmt.

Registriert man bei einem Probanden nun ein solches EEG, kann man während der Messung immer wieder Reize darbieten und deren Darbietungszeitpunkt zusammen mit der aufgezeichneten Aktivität vermerken. Anhand dieser Markierung, wann der Reiz genau dargeboten wurde, ist es möglich, das EEG in sehr viele kurze Segmente zu unterteilen. Mittelt man für jeden Zeitpunkt die Daten über alle so erhaltenen Segmente für jeden Kanal, nähert sich die nicht mit dem Ereignis im Zusammenhang stehende elektrische Hintergrundaktivität mit der steigenden Anzahl der Segmente immer mehr null. Am Ende bleibt nur noch die durch den Reiz im Mittel hervorgerufene „evozierte“ oder Ereignis-korrelierte Aktivität übrig [schrittweise Erläuterungen z.B. in Kobal und Hummel, 1991].

Insgesamt spielt die räumliche Anordnung der beteiligten Hirnbezirke und -zellen eine wichtige Rolle. Je nach beteiligter Hirnstruktur kommt es vor, dass benachbarte Neurone in bestimmter Anordnung gegenseitig ihre elektrischen Felder neutralisieren sich so der Analyse durch das EEG entziehen (Skrandies, 2005). Ein Beispiel hierfür ist das Kleinhirn, durch dessen intensive Faltung ein geschlossenes Feld entsteht (Brandeis, Michel und Amzica, 2009). Aber auch die Potentialverteilung auf der Kopfhaut wird beeinflusst, wie man anhand der "paradoxen Lateralisation" des P100, einer visuell evozierten Komponente, erkennen kann. Eigentlich wird die Information des ipsilateralen Gesichtsfeldes auf der contralateralen Hemiretina abgebildet und von dort auch weiter in der contralateralen Hemisphäre verarbeitet (Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005). Erfolgt jedoch eine visuelle Stimulation auf der linken Seite des Gesichtsfeldes, so erscheint das Maximum der P100-Amplitude nicht rechts, sondern links (Skrandies, 2005; Barrett et al., 1976).

Kognitive Netzwerke und die Rolle der Topographie

Ein- bis zweihundert Neurone bilden mittels dichter Verschaltungen untereinander eine Mini-Säule in der Hirnrinde, die in der Lage ist, einen nennenswerten Einfluss andernorts auszuüben. 50-80 solcher Strukturen bilden Makro-Säulen, die selbst schon als Funktionelle Einheiten tätig sein können und in diesem Zusammenhang auch "Module" genannt werden, weil sie zuweilen Sensibilitäten für Reize aufweisen, die in Nachbarstrukturen nicht zu finden sind. Beispielsweise reagieren einige auf die Aktivität bestimmter Berührungsrezeptoren (Zimmermann, 2005), andere auf die

räumliche Ausrichtung visueller Reize (Paik und Ringach, 2011). Mehrere verbundene Makro-Säulen bilden durch horizontale Verbindungen so genannte lokale corticale Netzwerke, welche auf niederem Niveau eine spezialisierte Funktion ausführen und eine anatomische Grundlage cognitiver Funktionen darstellen (Bressler und Tognoli, 2006, S. 140). Einzelne lokale corticale Netzwerke sind multifunktional und können einen Beitrag zu mehr als nur einer Funktion leisten. Dies ist allerdings nur bei gleichzeitiger Aktivierung des weitläufigeren Netzwerkes und seiner untereinander verbundenen Regionen möglich. Eine direkte Beziehung zwischen anatomischer Lage und der Funktion existiert nicht (Bressler und Tognoli, 2006, S. 143).

Neuronale Netzwerke agieren als Folge ihrer Plastizität in einem metastabilen Regime. Dies bedeutet eine Balance aus Stabilität und Flexibilität und die Möglichkeit, beliebige Stadien zwischen den beiden Extrempolen einzunehmen. Eine Rolle hierbei spielen die gegenseitigen Beeinflussungen und Begrenzungen lokaler Netzwerke, welche zu einer Selbstorganisation des Gesamtsystems führen. Folglich resultiert aus dieser Arbeitsweise das funktionelle Konzept sich abwechselnder stabiler und instabiler Zustände als Ausdruck cognitiver Prozesse (Bressler und Tognoli, 2006, S. 144).

Das Grundkonzept so genannter weitläufiger ("large-scale") neuronaler Netzwerke sieht eine zeitlich zusammenhängende Aktivierung einer spezifischen Konstellation untereinander verbundener lokaler Netzwerke vor. Jene agieren im Zusammenklang und sind Ausdruck des cognitiven Prozesses. Jedes lokale Netzwerk leistet hierbei einen eigenen, besonderen Beitrag (Bressler und Tognoli, 2006, S. 142).

Zumindest indirekt gehen die elektrischen Hirnstromfelder auf diese Netzwerke zurück. Diese Annahme kann unter anderem dadurch gestützt werden, dass Hirnstromfelder von mehreren und nicht nur einzelnen Generatoren erzeugt werden (Lehmann, 1986). Topographische Veränderungen sind daher Hinweise auf Unterschiede in den Verarbeitungsprozessen des Gehirns, wie es zum Beispiel von Skrandies (2005) ausgeführt wird.

Komponenten als Schritte der Informationsverarbeitung

Die Schritte der Informationsverarbeitung können auf der Betrachtungsebene der ereignisabhängigen Potentiale als so genannte „Komponenten“ nachvollzogen werden.

Eine „Komponente“ kann allgemein als größtenteils gleichzeitige Aktivität einer nennenswerten Anzahl an Nervenzellen einer bestimmten Konstellation bezeichnet werden, welche entsprechend starke elektrische Felder zu erzeugen vermag (Lehmann und Skrandies, 1980). Es gibt ferner zwei unterschiedliche Wege, diese Komponenten

genauer zu definieren. Auf der einen Seite werden sie klassisch entweder anhand eines Maximums oder eines Minimums der an einer Elektrode abgeleiteten Wellenform bezeichnet. Hierher rühren auch Bezeichnungen wie „P100“, d.h. ein positiver Ausschlag in der Kurve an einem definierten Ableitungsort etwa 100 Millisekunden nach der Reizdarbietung (Lehmann, 1986; Skrandies, 2005). Im erweiterten klassischen Sinne können diese Wellenformen auch hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung an den verschiedenen Ableitorten, der Abfolge, der Stimulusmodalität und Faktoren bezüglich der Versuchspersonen beurteilt werden (Sutton und Ruchkin, 1984). Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist die starke Abhängigkeit von der gewählten Referenzelektrode (Lehmann und Skrandies, 1980).

Auf der anderen Seite lassen sie sich topographisch über eine Abfolge von Potentialkarten mit recht stationären und stabilen Verteilungen definieren. Hier sind deutliche Gefälle und Steigungen, d.h. "hügelige" Potentialverhältnisse, als Ergebnis eben dieser Aktivierung, zu beobachten. Da Ladungsverhältnisse innerhalb der Karten verglichen werden, sind diese unabhängig von der Referenzelektrode und damit eindeutig interpretierbar. Bei der Betrachtung von Potentialkarten wird deutlich, dass sich die Verteilung der Ladungen nicht kontinuierlich verändert, sondern dass bestimmte Zustände über einen gewissen Zeitraum hinweg überraschend konstant halten. Zwischen diesen Konfigurationen sind dann stark veränderliche Übergangsaktivitäten zu erkennen. Ein Maximum der vorhandenen Potentialgradienten entspricht daher auch der größtmöglichen Ausprägung einer ERP-Komponente. (Lehmann und Skrandies, 1980).

Es bleibt anzumerken, dass bei der Beurteilung von ERPs an einzelnen Elektroden, wie in der Literatur oft getan, die Verlagerung eines Ladungsschwerpunktes (Centroiden) bei gleichbleibender Gesamtfeldstärke (GFP) ebenfalls zu einer Amplitudenveränderung an eben dieser einzelnen Elektrode führen kann. Somit könnte also bei eigentlich gleicher Gesamtfeldstärke ein rein topographischer Effekt entsprechend fehlgedeutet werden. Im konkreten Fall hier ist daraus zu schließen, dass Topographieveränderungen durchaus auf ähnlichen Mechanismen beruhen können, wie die in einigen zitierten Arbeiten gefunden Amplitudeneffekte. Abbildung 2 erläutert schematisch den Zusammenhang zwischen der topographischen Verteilung eines elektrischen Feldes auf der Kopfhaut und den Auswirkungen auf die Messwerte einzelner Elektroden. Topographische Veränderungen können bei der Betrachtung nur eines Ableitortes daher als reiner Amplitudeneffekt fehlinterpretiert werden. Näheres zu methodischen Vorgehensweisen ist den Seiten 48 ff. zu entnehmen.

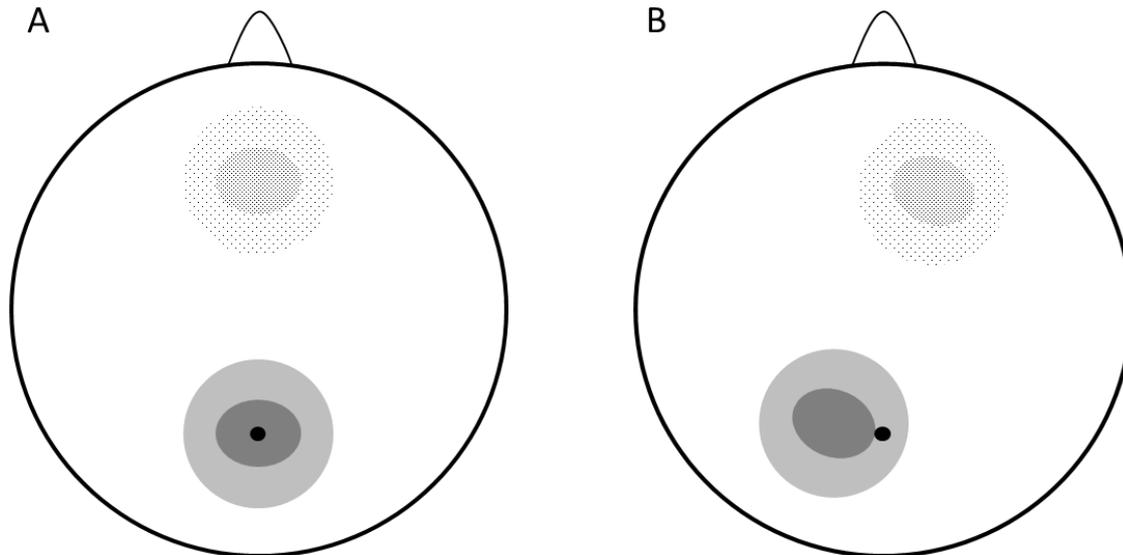


Abbildung 2 – Schema zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen topographischen Veränderungen und Messwerten an Einzelelektroden. Dargestellt ist der Skalp von oben, oben im Bild jeweils die Nase. Das Elektrodennetz ist bis auf eine einzelne Elektrode nicht abgebildet. Diese ist als schwarzer Punkt visualisiert. Es handelt sich um rein fiktive Daten. Ausgefüllte Bezirke stehen für positiv geladene Bereiche der Kopfhaut, gepunktete für negative. Dunklere Zonen symbolisieren einen höheren Betrag, d.h. stärker positive oder stärker negative Werte. Bis darauf, dass das erdachte elektrische Feld etwas den Mittelpunkt herum rotiert wurde, sind die beiden Abbildungen A und B identisch. Es gilt daher $GFP_A = GFP_B$. Die Messwerte an der dargestellten Elektrode (schwarzer Punkt) sind jedoch unterschiedlich. Es gilt $Potential_A > Potential_B$. Man sieht also, dass eine rein topographische Veränderung bei gleichbleibender GFP zu unterschiedlichen Messergebnissen an einzelnen Ableitelektroden führen kann.

Stimulus-Abhängigkeit der VEPs

Vor allem für klinische Fragestellungen werden so genannte „Musterumkehr-Reize“ (pattern-reversal stimuli) benutzt, bei der regelmäßige geometrische Muster, in Regel schwarz-weiß, ihren Kontrast umkehren. Dies bedeutet, dass aus einer weißen Zone eine schwarze wird, was in diesem Moment einen Stimulus darstellt. Jeder Phasenwechsel kann hierfür verwendet werden. Innerhalb dieser Gruppe von Reizen sind zwei Subtypen besonders relevant: Schachbrettmuster und Streifen. Die deutlich komplexeren Schachbrettmuster-Umkehr-Reize ("checkerboard reversals") gelten gegenüber den horizontal oder vertikal angeordneten schwarz-weißen Streifen („grating reversals“) als sensibler gegenüber kleinen Defiziten im visuellen System (Aminoff und Goodin, 1994, S. 494). Daneben werden auch „pattern-onset“-Reize beschrieben, d.h. die Darbietung eines Reizes mit einem folgenden Ruheintervall (siehe auch Saunders, Brown und McCulloch (1998)). Zwischen all diesen Arten grundlegender geometrischer Anordnungen kann es zu deutlichen Unterschieden in

den Ergebnissen, bzw. zu anderen Komponenten kommen. (Aminoff und Goodin, 1994; Di Russo, 2005; Saunders, 1998; u.v.m.).

Für unterschiedliche Fragestellungen ist es üblich, auch gänzlich andere visuelle Reize, wie z.B. Bilder, Worte oder Gesichter zu verwenden, die dann wieder andere oder veränderte Komponenten nach sich ziehen. (Balass, Nelson und Perfetti, 2010, S. 127; Skrandies, 1998; Skrandies, Reik und Kunze, 1999; Yen Na Yum, 2011; Bensafi et al., 2002; Hiessl, 2010 u.v.m.)

Auch die Darbietung bezogen auf die Versuchsperson spielt eine entscheidende Rolle. Einige Komponenten zeigen bei getrennter Stimulation der oberen und unteren Gesichtsfeldhälfte unterschiedliche Potentiale oder eine andere Topographie (Skrandies, 1987; Di Russo et al., 2005, S. 880).

Die „frühen“ Komponenten (N75, P100 und N160)

Grundsätzlich gilt, dass die meisten Komponenten nach Paradigma, Stimuluseigenschaften und auch Versuchspersonen in Latenz, Topographie und Amplitude variieren können (s.o.). Dennoch kommen vor allem die so genannten „frühen“ evozierten Potentiale in den meisten Experimenten in der einen oder andere Variante immer wieder vor. Dies bedeutet, dass bei visuell evozierten Potentialen durch verschiedene Reize in vergleichbaren Zeitbereichen häufig ähnliche, aber nicht identische corticale Aktivität nachzuweisen ist. Daher ist es trotz eingeschränkter Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Experimenten sinnvoll, häufige und grundlegende Komponenten evozierter Hirnaktivität vorzustellen.

Für Standard-Schachbrett-VEPs sind drei Komponenten im klinisch üblichen Zeitfenster, meist bis 200 ms nach der Reizdarbietung⁴, schon länger beschrieben und beziehen sich auf occipitale Messelektroden. Zunächst bildet sich negative Aktivität ca. 75 ms nach der Reizdarbietung, dann eine positive bei 100 ms (P100) und eine weitere negative bei etwa 145 ms (Aminoff und Goodin, 1994, S. 495). Di Russo et al. (2005) führten eigene Untersuchungen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) und EEG durch und verglichen sie mit den Beobachtungen anderer Arbeitsgruppen. Hierbei bestätigten sie die Ansicht, dass die Generatoren für das negative Potential bei ca. 75 ms nach dem Reiz (N75) im primären visuellen Cortex (sog. "V1"-Bereich, Area striata) zu finden seien. Ein gemeinsamer Ursprung zum "pattern-onset" visuell evozierten Potential "C1" wird angenommen.

⁴ Sofern nicht anders angegeben beziehen sich alle Zeitangaben auf die seit Beginn der Reizdarbietung vergangene Zeit und werden in [ms] angegeben.

Das P100 wird ebenfalls als Komponente primärer visueller Verarbeitung angesehen. Sie wird allerdings schon von kognitiven Aufgaben auch besonders durch den Stimulustyp beeinflusst (Skrandies, 1998; Skrandies, Reik und Kunze, 1999; Fu et al., 2012; Shimoyama et al., 1992). Auch geschlechtsspezifische Unterschiede sind zu finden (Skrandies, Reik und Kunze, 1999). Skrandies und Chiu (2003) vermutet für all diese frühen Einflüsse einen abwärts gerichteten regulierenden Prozess.

Im Gegensatz zur C1 [N75]-Komponente wird die P100-artige Komponente im Bereich von 120 bis 150 ms in Latenz und Amplitude durch willkürlich erhöhte Aufmerksamkeit beeinflusst. Beim aktiven, aufmerksamen Betrachten von Reizen im peripheren Gesichtsfeld wird im Gegensatz um passiven Betrachten die Amplitude größer und die Latenz kürzer (Fu et al., 2010)

P100 und N75 haben nicht den gleichen Ursprung im Gehirn, da ein normales N75 zusammen mit einem abnormalen P100 vorliegen kann (Ghilardi, 1991, zit. in Aminoff und Goodin, 1994, S. 496). Auch Hartikainen und Knight (2003) fassen Ergebnisse zusammen, welche dem P100 und der folgenden negativen Komponente einen Generator außerhalb der Area striata zuordnen. Di Russo et al. (2005) weisen einer P100-artigen Komponente in ihrem Experiment ebenfalls einen extrastriatalen Generator zu.

Ein posteriores, bilaterales N160 (pattern-reversal) konnte auf Neuronengruppen in den Regionen VP [ventroposteriorer Bereich des occipito-temporalen Übergangs, siehe Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005], V4v und V4/V8 zurückgeführt werden, d.h. in ventralen occipitalen Gebieten und damit auch „extrastriatal“ (Di Russo et al., 2005, S. 882). Mit „extrastriatal“ sind Zonen außerhalb der Area striata des Occipitallappens gemeint, die im Prinzip der funktionellen Area V1 entspricht (Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005, S. 393).

P300

Die so genannte P300 Welle - auch P3 genannt - ist eine meist parieto-centrale Positivität und wird häufig im Zeitfenster zwischen 200 und 400 ms veranschlagt. Ihre Amplitude beträgt bis zu 10 μ V. Die Mittelung kann sich als schwierig erweisen, da sie zwischen den einzelnen Messungen durchaus deutlichen Schwankungen in Amplitude und Latenz unterliegen kann (Picton, 1992).

Das P300 unterliegt am Ehesten dem Einfluss mehrerer, zum Teil zeitlich überlappenden neuronalen Prozessen, die daher miteinander interferierende elektrische Felder generieren. Drei Prozesse mit positiver Polarität sind im Bereich des

üblichen Zeitfensters für das P300 bekannt. P3a um 250 ms, P3b um 350 ms und die so genannte langsame positive Welle ("slow positive wave") (Picton, 1992).

Eine größere P300-Welle kommt vor allem dann vor, wenn zwischen etlichen bedeutungslosen Reizen ein solcher erkannt wird, auf den die Versuchsperson besonders achten sollte. Jener Reiz sollte wichtig und nach dem Zufallsprinzip eingestreut sein und hierbei eine geringe Auftretenswahrscheinlichkeit haben. Diese Art des Versuches wird „oddball“-Paradigma genannt (Picton, 1992) Dieses erzeugt recht verlässlich parietocentral lokalisierte elektrische P300-Hirnaktivität (Linden, 2005, S. 563). Das P300 tritt weitestgehend unabhängig von der Art und Modalität des Reizes auf und man glaubt, dass ein einen Prozess kognitiver Verarbeitung repräsentiert. Vor allem scheint es bei solchen Stimuli aufzutreten, die mit einer erhöhten Aufmerksamkeit bzw. einer Relevanz für eine kognitive Aufgabe verbunden sind. Picton (1992) postulieren, die Latenz der P300-Komponente habe Bezug zur Fähigkeit einer Person, kleinere Aufgaben zu lösen. Besonders bei Versuchen mit längeren Antwortzeiten bestand erhöhte Korrelation der P300-Latenz mit der Antwortverzögerung der Versuchspersonen. Es erscheint weniger, als Stünde das P300 für eine tatsächliche Entscheidungsfindung bezüglich einer Reaktion auf einen Stimulus als für die Vervollständigung einer Beurteilung desselben (Picton, 1992, S. 462). Es wird angenommen, das P300 stelle einen Repräsentanten für die Prozesse dar, die zur Änderung des mentalen Modells der Umgebung nötig sind, um aufgabenrelevante Entscheidungen zu fällen. Sowohl Aufmerksamkeit als auch Arbeitsgedächtnis scheinen eine Rolle zu spielen. Erhöhte Latenz und verringerte Amplitude sind möglicherweise Anzeichen für eine allgemeine Verlangsamung kognitiver Prozesse (Linden, 2005, S. 564). Die topographische Verteilung der P300-Komponente variiert je nach Experiment, was entweder bedeutet, dass sie von unterschiedlichen anderen Komponenten überlagert wird, oder dass es nicht nur einen, sondern mehrere Generatoren dieser Komponente gibt. Tatsächlich halten dies mehrere Autoren für sehr wahrscheinlich (Picton, 1992, S. 463–465; Linden, 2005)

Neue, einzigartige und auffällige Stimuli erzeugen im Gegensatz zu weniger auffälligen, aber dafür aufgabenrelevanten Stimuli eine Komponente, die etwas früher und mehr frontocentral auftritt. Man nennt dies das "novelty-related" P3a (Linden, 2005, S. 564). Allgemein gilt für das P3b, d.h. den parietooccipitalen Anteil des P300, dass es bevorzugt durch das aufmerksame Erleben aufgabenrelevanter Reize hervorgerufen wird. (Linden, 2005)

Die Lokalisation der Generatoren für die Felder, denen das P300 zugrunde liegen soll, gestaltet sich sowohl für das P3a als auch für das P3b als schwierig. Am ehesten lässt sich festhalten, dass vor allem Zonen des inferioren Temporallappens und des temporoparietalen Übergangs ("temporo-parietal junction", TPJ) an den Potentialverteilungen beider Anteile beteiligt sind. Letzterer ist für die Erzeugung des P3b unerlässlich. Laterale Anteile des prefrontalen Cortex sind eher nur bei P3a durch neuwertige Stimuli beteiligt (Linden, 2005, S. 566). Dem TPJ wird eine Funktion bezüglich der Reiz-bezogenen Aufmerksamkeit zugesprochen. Der posteriore parietale Cortex (PPC) erfüllt Aufgaben im Bereich der zielgerichteten Aufmerksamkeit und visuo-motorischen Integration (Linden, 2005, S. 571).

Evozierte Potentiale bei Wortverarbeitung und Lernen

Für Menschen, die eine Sprache verstehen, tragen deren Worte sowohl grafische als auch phonetische Informationen. Das heißt, dass ein Wort von der Schreibweise als auch von der Aussprache, die sich daraus ergibt, eine Verknüpfung zu einer festgelegten Bedeutung hat (Yen Na Yum, 2011). Auf der Verhaltensebene gibt es durchaus Unterschiede auf welche Weise ein Wort erlernt wurde. Die Schriftform scheint robuster zu sein (Balass, Nelson und Perfetti, 2010).

Semantische Dimensionen haben nach Skrandies (1998) schon zwischen 80 und 265 ms nach der Reizdarbietung einen Einfluss auf die Gesamtfeldstärke und Latenz durch Worte evozierter Aktivität. Für das P100 zeigten sie außerdem eine 4 ms höhere Latenz und eine kleinere Amplitude bei Worten gegenüber Schachbrettmustern. Auch Hiesl und Skrandies (2013) zeigten, dass Bedeutungsdimensionen von Worten die Informationsverarbeitung schon bei rund 100 ms nach der Reizdarbietung beeinflussen können. Diese sind kultur- und sprachunabhängig (Skrandies und Chiu, 2003, S. 48).

Balass, Nelson und Perfetti (2010); Perfetti, Wlotko und Hart (2005) untersuchten eine centroparietale „P600“-Komponente, den so genannten „old/new-effect“. Im Vergleich vorher bekannten Worten zeigte diese Komponente größere Amplituden bei Worten, die aktuell gelernt worden waren.

Key, Molfese und Ratajczak (2006) benutzten erfundene Symbole und ließen Versuchspersonen hierzu jeweils einzigartige „Namen“ erlernen. Stärkere linkshemisphärische Aktivität fand sich bei gelernten Symbolen zwischen 160 und 508 ms. Im Gegensatz hierzu sind Symbole, die noch nicht gelernt wurden, rechts stärker vertreten. Für neue Stimuli konnte kein Effekt gezeigt werden. Ähnliches gilt für 380-668 ms. Auch wenn die Zeitfenster durchaus großzügig gewählt sind, kann man

ableiten, dass das Erlernen einer Bedeutung für bestimmte Symbole Auswirkungen auf die Elektrophysiologie hat.

N400, ein Ausdruck inkongruenter Bedeutung

Kutas und Hillyard (1980) beschrieben eine negative Komponente, die zwischen 250 ms und 400 ms vorliegt und deren größte Amplitude bei circa 400 ms zu finden ist. Als Stimulus dient ein Wort, welches zu einem zuvor sequenziell dargebotenen Satz semantisch nicht passt („Er bestrich das Brot mit ... Socken“).

N400 wird vor allem im Hinblick auf semantisch inkongruente Kombinationen von Wörtern oder Wortbestandteilen beobachtet (Duncan et al., 2009). Dies macht es auch möglich, das Lernen von Bedeutungen elektrophysiologisch nachzuvollziehen. Perfetti, Wlotko und Hart (2005) ließen Versuchspersonen die Bedeutung unbekannter Wörter erlernen. Anschließend wurde eine Messung evozierter Potentiale durchgeführt. Als erster Reiz dienten ungelernete oder gelernte Wörter. In kurzem zeitlichen Abstand hierzu folgte jeweils als zweiter Reiz ein weiteres, allerdings verständliches „Sonden“-Wort. Dieses war entweder mit oder ohne semantischen Zusammenhang zum ersten Reiz. Eine Abnahme der Negativität des durch kongruente „Sonden“-Worte hervorgerufenen N400 ist als Hinweis auf das Erlernen der Bedeutung zu verstehen (Perfetti, Wlotko und Hart, 2005). Die globale Situation, die z.B. in einem Text geschildert wird, hat ebenfalls einen Einfluss auf das N400 (Debruille, 2007). Allerdings werden auch N400-artige Aktivitäten als Antwort auf andere, bedeutungsvolle nicht-sprachliche Stimuli beobachtet. Hierzu gehören Strichzeichnungen, Photographien oder Geräusche. Die davon hervorgerufenen Potentiale sind ebenfalls größer, wenn konzeptuell andere Reize aufeinander folgen. Man spricht deswegen von "N400-artig", weil sie sich hinsichtlich der topographischen Verteilung auf der Kopfoberfläche vom sprachlichen N400 unterscheiden. Das Maximum der Komponente liegt etwas mehr anterior als bei Wörtern. Duncan et al vermuten, dass beide Klassen des N400 ähnliche Verarbeitungsprozesse darstellen, die zum Teil von den gleichen, aber auch unterschiedlichen neuronalen Gruppen durchgeführt werden (Duncan et al., 2009). Auch ohne „semantische Inkongruenz“ im Experiment kann durch sprachliche Reize ein N400 hervorgerufen werden (Hayashi et al., 1998).

Insgesamt repräsentiert N400 ein neuronales System, welches unabhängig von der Modalität des Stimulus ist (Sarfarazi, 1999). Beispiele hierfür sind auch in dieser Arbeit zitiert (Grigor, 1995; Grigor et al., 1999; Castle, van Toller und Milligan, 2000; Sarfarazi, 1999; Seo et al., 2010).

Die Theorie der "semantischen Inhibition" (Debrulle, 2007) suggeriert, das Unterdrücken unnötig abgerufener Information erzeuge eine höhere N400-Amplitude. Die sei beispielsweise bei Wörtern mit vielen orthographischen Nachbarn (z.B. Keller und Keiler), aber auch bei einer erzeugten Erwartungshaltung durch voran gegangene Information der Fall. Dieser Hypothese entsprechend sind schwer zu verarbeitende Reize mit einem erhöhten Fluss an Information verbunden, die unterdrückt werden müssen, um den relevanten Anteil zu isolieren.

Visuell evozierte Potentiale durch Schriftzeichen

Prinzipiell zeigen logographische Schriften wie Chinesisch oder Japanisch als Reize elektrophysiologisch ähnliche Eigenschaften wie alphabetische Schriften (z.B. Deutsch oder Englisch). Chinesen und Deutsche zeigen auch ähnliche Veränderungen durch die Manipulation semantischer Kategorien (Skrandies und Chiu, 2003). Engländer und Chinesen, die ihre Muttersprache lesen, zeigen jedoch Unterschiede im N170, was durchaus für Unterschiede in der Prozessierung logographischer und alphabetischer Sprachen spricht (Yen Na Yum, 2011).

Man kann davon ausgehen, dass japanische oder chinesische Symbole von einem nicht Sprachkompetenten lediglich als bedeutungslose Zeichen verstanden und verarbeitet werden. Deswegen funktionieren Kanji ohne Bedeutung für den Lesenden nicht als linguistische Einheiten (Hayashi et al., 1998, S. 380). Allgemein können Schriftzeichen in verschiedenen Paradigmen als Stimuli dienen und ihre neuronale Verarbeitung untersucht werden. Hierbei kommen häufig dieselben Methoden zum Einsatz wie in der Neurolinguistik alphanumerischer Sprachen.

Im Vergleich zu Gesichtern als Stimuli riefen chinesische Schriftzeichen kleinere P120 hervor (Fu et al., 2012). Dies würde in der Tendenz die Ergebnisse von Skrandies (1998) ergänzen, die allerdings mit Schachbrettmustern verglichen.

Shimoyama et al. (1992) bilden eine Differenz zwischen weißem Rauschbild und Kanji-Symbolen. Vom „Grand Mean“ der verbalen VEPs werden die non-verbalen abgezogen. Hier zeigt sich ein vor allem ein Unterschied in der Amplitude occipital schon um 100 ms, occipito-temporal zwischen 200 und 300 ms und occipital zwischen 300 und 400 ms. Weitere, diffusere Differenzen wurden beobachtet. Die Studie bezieht sich zwar nur auf Daten von lediglich sechs Versuchspersonen, doch wird auch hier ein früher Unterschied in der Verarbeitung von bedeutungsvollen und bedeutungslosen logographischen Stimuli gezeigt. Passend hierzu demonstrierten Yen Na Yum (2011) eine occipital stärkere Negativität bei Wörter im ggs. zu Bildern zwischen 200 und 300 ms.

Bei Fu et al. (2012) rufen chinesische Zeichen ein nach links lateralisiertes, occipito-temporales N170 hervor. Ebenso ist in einer Arbeit von Yen Na Yum (2011) bei chinesischen Wörtern, die von Chinesen gelesen werden. Im Gegensatz hierzu erzeugen unbekannte chinesische Schriftzeichen erzeugen zwischen 300 und 500 ms eine verstärkte, links frontale Negativität.

Hayashi et al. (1998) fanden keine Unterschiede zwischen bedeutungsvollen und überholten (d.h. bedeutungslosen) Kanji-Zeichen in frühen visuell evozierten Potentialen. Das N400 jedoch, welches sie als parieto-occipitales N340 vorfanden, war abhängig von diesen beiden Stimulustypen. Je bedeutungsvoller das Symbol, desto größer das N400, obwohl kein klassisches N400-Paradigma benutzt wurde. Kanji ohne Bedeutung erreichten dies nicht.

Das P100 durch chinesische Schriftzeichen hatte bei Wei et al. (2001) auf der zum Gesichtsfeld contralateralen Hirnseite eine kürzere Latenz als auf der ipsilateralen. Ein solcher, anatomisch gut nachvollziehbarer Effekt war für das N1 (um 150 ms) nicht nachweisbar. Für das N1 in der genannten Veröffentlichung zeigte sich unabhängig von der gereizten Gesichtsfeldhälfte für die rechte Hemisphäre eine kürzere Latenz gegenüber der linken. Dies ist anatomisch im ersten Moment eigentlich nicht logisch. Dafür allerdings war die Amplitude des N1 links generell höher. Dies spiegelt nach Ansicht der Autoren eine betont linkshemisphärische Verarbeitung des N1 wieder, die allerdings im Zusammenhang mit der anderen Seite geschieht. Sie denken, die Information werde zuerst von der rechten an die linke Hemisphäre vermittelt (Wei et al., 2001).

Schriftzeichen - einbezogene Hirnareale

Welche Anteile des Gehirns sind nun aber speziell beim Lesen asiatischer Schriftzeichen beteiligt? Da ein Rückschluss auf beteiligte Hirnareale durch Elektrophysiologie alleine recht schwierig ist, kann es sinnvoll sein, andere Methoden mit einzubeziehen. Tan et al. (2000) sichtet umfangreiche Literatur und führten eine Untersuchung mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT bzw. fMRI) durch. Beim Lesen chinesischer Zeichen durch Muttersprachler zeigten sich zwei unterschiedliche Lateralisationseffekte. Zum Einen waren linksseitig frontale Gebiete (Gyrus frontalis medius, Brodmann-Areal 9 und Gyrus frontalis inferior, BA47), sowie der Gyrus fusiformis⁵ (BA37) erregt. Die Area 9 spielt eine Rolle bei der semantischen

⁵ Gyrus fusiformis entspricht dem Gyrus occipitotemporalis lateralis und grenzt lateral an den Gyrus lingualis. Beide gehören zum Temporallappen (BrainInfo, 1991-heute).

Verarbeitung der Worte. Das Areal 37 scheint bei der Worterkennung mitzuwirken und integrative Funktionen auszuführen, wofür die Autoren einige Nachweise erbringen. Zum Anderen zeigte sich, dass die occipitalen Areale 17 bis 19 (Gyrus fusiformis und Gyrus lingualis), sowie die parietalen Areale 3 und 1 betont rechtsseitig erregt wurden. Eine sichere Begründung können die Autoren nicht nennen. Natürlich fasst die funktionelle Magnetresonanztomographie aufgrund ihrer geringen zeitlichen Auflösung einen gewissen Zeitraum zusammen. Über eine genaue Abfolge der genannten Aktivierungen kann daher hierdurch keine Aussage getroffen werden. Allerdings ist die Mitarbeit des inferioren Temporallappens u.a. an der Entschlüsselung komplexer visueller Konstrukte bereits bekannt (Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005; Mishkin, Ungerleider und Macko, 1983).

Eine Läsionsstudie von Iwata (1986) birgt Hinweise, nach denen semantisches Lesen und das Erkennen von komplexen Ideogrammen wie Kanji-Zeichen besonders in einem System mit Beteiligung des linken posterioren unteren Temporallappenanteils ("PIT") von statten gehen, während phonologische Lese- und Schreibsysteme über den Gyrus angularis verschaltet sind.

Einfluss von Gerüchen auf elektrophysiologische Parameter

Von den olfaktorisch evozierten Potentialen, d.h. Hirnstrom-Potentialen, die durch Gerüche hervorgerufen werden (zum Beispiel Seo et al., 2010), sind die Einflüsse von Duftstoffen auf durch verschiedene andere Modalitäten hervorgerufenen elektrischen Antworten des Gehirns abzugrenzen.

Iijima et al. (1998) untersuchten neurologische Patienten in einem Oddball-Paradigma mittels akustisch evozierter Potentiale. Bei cerebrovasculär geschädigten Patienten mit pathologischen kognitiven Fähigkeiten lag die maximale Amplitude des P300 an den Elektroden C3, P3 und Pz während der Parfüm-Inhalation signifikant höher als davor oder danach. Die Autoren schließen hieraus, "... dass Parfüm die Zuteilung [...] von Ressourcen der Informationsverarbeitung verbessert."

Eine weitere Studie von Iijima et al. (2009) konnte ebenfalls Effekte auf ERP-Komponenten während einer Geruchsexposition in einem so genannten „go / no-go“-Paradigma zeigen. Hierbei sollen Versuchspersonen nur beim Auftreten eines bestimmten Zeichens die Antworttaste drücken und ansonsten nichts tun. Das Riechen von Räucherstäbchen führte an Cz und Fz zu einer signifikante Erhöhung der Amplitude der no-go P3-Bedingung [350-500ms] im Vergleich zu vorher. Für das go-P3 ergab sich dieser Effekt nur für Frischluft an Fz. Für Rosenduft konnte gar kein Effekt

nachgewiesen werden. Die Autoren schlussfolgern, dass durch die zahlreichen Verbindungen des olfaktorischen Cortex zu anderen Zentren, Gerüche, wie der des Räucherstäbchens, emotionale Reaktionen und Gedächtnisinhalte provozieren. Auf mögliche pharmakologische Effekte wird allerdings nicht eingegangen.

Bensafi et al. (2002) ließen Versuchspersonen schnell emotional ausdruckslose Frauengesichter affektiv bewerten. Bei einer Messung an einer frontalen Elektrode („FGz“, anterior zu Fz) unter der Bedingung mit dem angenehmen Hintergrundgeruch fand sich ein signifikanter Unterschied in der Amplitude des LPC (late positive complex, P3). Dieser LPC stellte sich durch das Betrachten der als unangenehm eingestuften Gesichter mit einer höheren positiven Amplitude dar. Im Gegensatz hierzu fiel die Amplitude bei „angenehmen“ Gesichtern kleiner aus. Dieser Unterschied zwischen dem LPC bei gefälligen und dem LPC bei unangenehmen Gesichtern erschien in der geruchsneutralen Kontrollbedingung nicht (Bensafi et al., 2002, S. 340).

Beim Zuordnen olfaktorischer Stimuli zu einer visuell dargebotenen Bezeichnung verstärkt sich eine links frontale Negativität, welche einen Einfluss auf die klassischen Komponenten bei 100, 180, 280 und 380 ms ausübt. Die Amplitude dieses elektrophysiologischen Phänomens hat einen signifikanten Bezug zur allgemeinen olfaktorischen Leistungsfähigkeit einer Person. Dies scheint darüber hinaus die Rolle des frontalen Cortex beim multifokalen Prozess der korrekten Identifikation von Gerüchen widerzuspiegeln (Lorig et al., 1993).

In einigen Studien konnte ein N400-Effekt gezeigt werden, wenn Versuchspersonen Gerüche im Zusammenhang mit dazu nicht passenden Bildern (VEPs) wahrnehmen, was für eine deutliche multimodale Verarbeitung in diesen beiden Systemen spricht. (Grigor, 1995; Grigor et al., 1999; Castle, van Toller und Milligan, 2000; Sarfarazi, 1999) Auch wurde umgekehrt der Einfluss von visuellen Stimuli auf olfaktorisch evozierte Potentiale untersucht (Seo et al., 2010).

Auch Gerüche unterhalb der bewussten Wahrnehmungsschwelle beeinflussen übrigens EEG und Verhalten (Lorig, 1994), wodurch davon auszugehen ist, dass dies auch für evozierte Hirnaktivität im Rahmen dieser Arbeit gelten kann.

Es existieren also zahlreiche Beispiele für die Beeinflussung visuell evozierter Aktivität durch Gerüche im Allgemeinen.

Zielsetzung

Japanische Symbole werden in dieser Arbeit dazu benutzt, um visuell evozierte Potentiale hervorzurufen. Deren Verteilung über den Skalp im Verlauf der Zeit ist dabei wesentlicher Gegenstand der Betrachtung. Es erfolgen Messungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten, nämlich einmal vor und einmal nach dem Lernen der Zeichen. Anschließend wird die Erinnerungsleistung der Versuchspersonen geprüft, sodass deren Lernleistung ermittelt werden kann.

Die Versuchspersonen sind in drei verschiedene Gruppen eingeteilt, denen entsprechend sie bestimmten Geruchskonstellationen ausgesetzt sind. So ist es möglich, die elektrophysiologischen Veränderungen durch das Lernen der Symbole als solches, aber auch in Abhängigkeit von den dargebotenen Gerüchen und Geruchskonstellationen zu erfassen.

Methoden

Gemeinsame Elemente beider Versuchsteile

Im Vorfeld der EEG-Messungen sollten verschiedene unklare Faktoren hinsichtlich der Methodik geklärt werden. Erstens wollte man erfahren, ob die Aufgabe für die Versuchspersonen ausreichend sensitiv ist, um damit Unterschiede festzustellen. Zweitens war das Ziel, die Methodik der Geruchsdarbietung orientierend zu prüfen. Drittens sollte der Vorversuch erste Hinweise auf einen Effekt der Geruchsdarbietung auf der Verhaltensebene liefern. Hierzu wurde ein Vorexperiment („Vorversuch“, „Aufbau A“) ohne EEG-Messungen durchgeführt. Grundsätzlich unterschieden sich die beiden Versuchsteile lediglich in ihrem Ablauf und in Einzelheiten, z.B. der Gruppenzuweisung etwas. Die Gerüche und die Lernelemente unterschieden sich nicht (siehe auch Abbildung 3).

Anwendung der Gerüche

Geruchsphasen

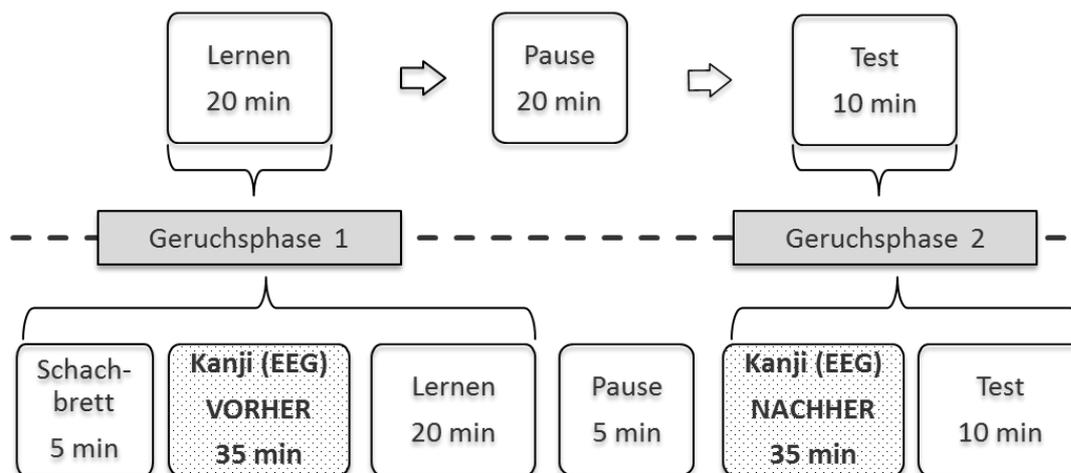
Eine Geruchsphase fasst einen oder mehrere Anteile des Versuchsablaufes zusammen, indem genau der gleiche Geruch dargeboten wird. Innerhalb einer Geruchsphase wurde der Geruch also nicht gewechselt. Geruchsphase 1 umfasst die Messung von Schachbrettmuster-VEPs, die EEG-Messung vor dem Lernen („vorher“) und das Lernen selbst. Geruchsphase 2 umfasst die Messung „nachher“ und das Testen. Abbildung 3 ist eine Skizze der Abläufe beider Versuchsteile und erläutert, welche Elemente in welche Geruchsphase fallen.

Geruchsbedingungen

Grundsätzlich wurden die Versuchspersonen in drei Gruppen eingeteilt, welche jeweils einer bestimmten Geruchsbedingung entsprachen. Die erste war die Kontrollgruppe, für die lediglich Wasser in den Duftverteiler eingebracht wurde. Sie entspricht daher der Geruchsbedingung „geruchlos“. Einer weiteren Gruppe wurde während Geruchsphase 1 (Messung „vorher“ und Lernen) und -phase 2 (Messung „nachher“ und Test) identisch Zitronenduft dargeboten („kongruent“). In der dritten Gruppe erhielten die Freiwilligen verschiedene Gerüche; zunächst in Geruchsphase 1 Zitronenduft und in der darauffolgenden Geruchsphase 2 Fichtennadelgeruch (inkongruent). Eine zunächst geplante Gruppe mit der Kombination Zitrone/Wasser wurde aus Zeitgründen nicht getestet.

Diese Auswahl der genannten Gerüche im Speziellen erfolgte deshalb, weil sie hinsichtlich ihrer subjektiven Bewertung, ob sie angenehm oder unangenehm sind, quasi keinen Unterschied aufweisen (Reik und Skrandies, 2006). Zitrone und Fichte unterscheiden sich deutlich in der "Stärke" und besonders extrem hinsichtlich der Dimension "Aktivität". Hierbei wird Zitrone der höchste Wert aller in der genannten Arbeit erfassten Düfte zugeordnet. Diese Dimensionen gelten im Allgemeinen als überkulturell einsetzbar (Skrandies und Chiu, 2003).

Vorversuch (nur Verhalten)



Hauptversuch („EEG“)

Abbildung 3 – Skizze der Abläufe von Vor- und Hauptversuch. Das Lernen dauerte jeweils 20 Minuten, das Testen 10 Minuten. Die Zeit zwischen Lernen und Test war im Vorversuch auf 20 Minuten festgelegt, im Hauptversuch variierte sie etwas in Folge der unterschiedlich langen Messdauern des EEG bzw. der evozierten Potentiale. Eine Pflichtpause von 5 Minuten war für alle Versuchspersonen im Hauptversuch verbindlich. Im Mittel betrug die gesamte Zeit von Ende des Lernens bis Anfang des Tests 41,8 min (SD = 5,2 min). In beiden Versuchsaufbauten wurden die Umgebungsgerüche in Geruchsphase 1 und 2 entsprechend der Bedingungen „geruchlos“ (kein Geruch), „kongruent“ (Zitronengeruch in Phase 1 und 2) und „inkongruent“ (Zitrone in Phase 1 und Fichte in Phase 2) verändert.

Charakteristika der Substanzen

Als olfaktorische Stimuli nutzten wir im Fachhandel weit verbreitete Duftöle der Firma Caesar und Loretz GmbH.

Zur Erzeugung des Zitronengeruches kam „Caelo Profuma Zitronenöl – Citrus Limon“ zum Einsatz (Art.-Nr. W373; PZN 4848477). Fugmann et al. (1997) bezeichnen es allgemein als „leicht bewegliches, hellgelbes bis grünlich-gelbes Öl mit einem frischen, strahlenden Geruch nach geriebenen Zitronenschalen und frischem, bitter-saurem Geschmack“. Es wird, wie in unserem Fall, durch Pressen aus der Schale der

Zitronenfrucht (*Citrus limon*) gewonnen. Hauptproduzenten sind Italien, USA, Argentinien, Israel und Spanien. Seine Hauptbestandteile sind (+)-Limonen (ca. 65%) und beta-Pinen (ca. 10%). Wesentlich geruchs- und geschmacksgebend ist Citral (ca. 3-5%, Geranial und Neral). (Fugmann et al., 1997, S. 138–139) In unserem Fall ist laut Caesar und Loretz GmbH (2009+2010) ebenfalls Citronellol enthalten.

Um den Raum in Fichtennadelgeruch zu tauchen benutzten wir „Caelo Oleum ‚Pini Sibiricum““ (Art.-Nr. G482). Wie alle Fichten- oder Kiefernadelöle besitzt es überwiegend einen „frischen, harzig-kienigen Geruch“ und besteht aus Monoterpenkohlenwasserstoffen wie den Pinenen, den Phellandrenen, Camphen, Myrcen, 3-Caren und Limonen. Wesentlicher geruchsgebender Inhaltsstoff ist (-)-Bornylacetat, das besonders hier zu über 30% enthalten sein kann. (Fugmann et al., 1997, S. 225)

Duftdarbietung

Zur Verteilung der Gerüche im Raum wurde in beiden Fällen ein speziell für unseren Zweck entwickeltes und gebautes Gerät benutzt. Auf einer Seite des Gehäuses ist ein Tangential- bzw. Querstrom-Lüfter des Typs 618-A der Fa. Rayer angebracht, welcher nach Herstellerangaben ca. 80m³ Raumluft pro Minute über Kunststoffplatten aus Polyoxymethylen („Delrin“) in einem Einschubfach leitet. Auf diesen austauschbaren Platten mit einer DIN-A-4-ähnlichen Fläche von 20,6 cm x 29,6 cm (619,8 cm²) musste die jeweilige Portion des Duftöls vorher mit der Hilfe eines Glasstabes möglichst vollständig verteilt werden. Aufgrund der geringen Mengen war dies in der Praxis nur bedingt möglich. Da separate Platten für jeden Duftstoff zur Verfügung standen, war eine Zwischenreinigung nicht nötig. Die Laufzeit des Lüfters war stets zwei Minuten je Inbetriebnahme. Das Gerät und sein Aufbau sind in Abbildung 4 skizziert.

Die Wahl fiel nicht ohne Grund auf diese Art der Darbietung. Bei der Erprobung anderer Techniken, nämlich erhitzbarer Duftschildchen und Verneblern, fiel auf, dass die subjektiv empfundene Qualität des Geruches deutlich anders war als bei einer langsamen Verdunstung, z.B. auf einem Blatt Papier. Dies ist dem Umstand zuzuschreiben, dass Duftöle aus verschiedenen Substanzen mit speziellen Einzelgerüchen bestehen (Fugmann et al., 1997).

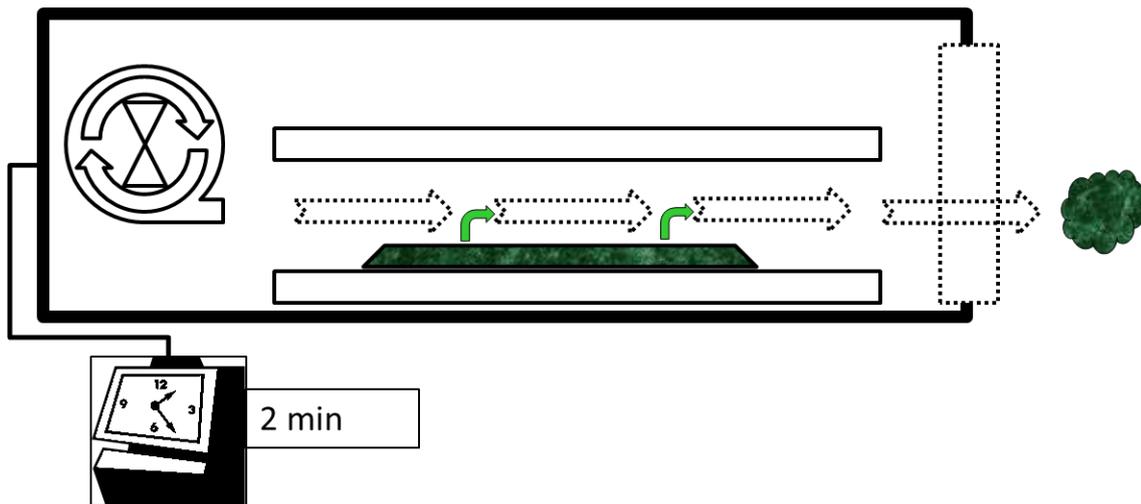


Abbildung 4 - Skizze des „Lüfters“, eines Gerätes, welches auf einer DIN-A-4-ähnlichen Fläche aufgebrachtes Düftöl mittels eines Tangentiallüfters in der Raumluft verteilt. Eine Zeitschaltuhr erlaubte die Inbetriebnahme für genau zwei Minuten. Diese Zeit reichte aus, um subjektiv die gesamte Menge im Raum zu verteilen.

Diese Bestandteile haben unterschiedliche Siedetemperaturen und Flüchtigkeiten, was wiederum beim passiven, gewöhnlichen Verdunsten zu einer bestimmten relativen Zusammensetzung in der Gasphase führt. Für uns Menschen entsteht nur bei dieser charakteristischen Zusammensetzung die typische Geruchswahrnehmung. Alle anderen Konstellationen, vor allem höhere Konzentrationen schwer flüchtiger Begleitstoffe, verursachen eine für uns auf die Natursubstanz bezogene subjektiv inkorrekte oder sogar unangenehme Empfindung. Daher wurde eben ein Verteilungsmechanismus ohne zusätzliche Wärmezufuhr oder Zerstäubung gewählt.

Die Rauminhalte der Versuchsräume lagen bei etwa 23,22m³ (Vorversuch) und etwa 22,65m³ (EEG-Kammer). Der Unterschied zwischen beiden Volumina betrug daher lediglich ca. 2,5%. Da genaue Angaben zu den Inhaltsstoffen schwanken, erscheint eine Angabe der exakten Stoffkonzentration in [mol/l] oder Volumenprozent im Rahmen des Experimentes wenig zweckmäßig, zumal lediglich deutlich überschwellige Geruchseindrücke zum Einsatz kommen sollten. Daher wird nur zur Orientierung angegeben, welches Volumen an flüssigem Düftöl in einem Raum bestimmter Größe benutzt wurde, sodass die Reproduzierbarkeit gegeben ist. Zunächst wurden im Vorversuch zu den genannten Zeitpunkten 0,05 cm³ des Düftöls benutzt, die mit einer handelsüblichen 1ml-Spritze und einer Kanüle abgemessen wurden. Unter der rein hypothetischen Annahme, der Raum sei völlig luftdicht und das Substanzgemisch gehe sofort vollständig in die Gasphase, entspricht dies einer Dosierung von 0,00215 cm³ pro m³ Raumluft.

In der Orientierungsphase nach dem Abschluss des Vorexperimentes und dem Beginn der EEG-Messungen stellte sich bei rein technischen Testläufen mit persönlichen Bekannten heraus, dass die subjektive Intensitätsempfindung für die Geruchsstoffe in der EEG-Messkammer stärker abfiel, als unter den Bedingungen des Vorversuches. Als möglichen Grund hierfür kann man vor allem die verlängerten Intervalle zwischen den Applikationen in Betracht ziehen. Aus diesem Grund erfolgte die Entscheidung, das im EEG-Versuch zu verwendende Duftstoffvolumen je Einzelgabe um 50% auf 0,075 ml zu erhöhen. Die Dosierung liegt in diesem Fall daher bei 0,0033 cm³ flüssigem Duftöl pro m³ Raumluft und ist somit objektiv ca. 54% höher als im Vorversuch. Für Versuchspersonen in der Kontrollgruppe („geruchlos“) bestückte der Versuchsleiter den Lüfter bei jeder Inbetriebnahme lediglich mit einer volumengleichen Menge Wasser, wobei die Applikation auf die gleiche Weise erfolgte. Eine objektivierte Kontrolle der Geruchsintensität mit Probanden, wie z.B. in Grigor et al. (1999), um allgemein gültige, mittlere Dosierungen zu finden, fand allerdings nicht statt.

Stimuli: Japanische Kanji-Schriftzeichen

Im Rahmen eines Projektes mit einem japanischen Gastforscher stellte sich die Frage nach elektrophysiologischen Korrelaten des Erlernens so genannter „Kanji“-Symbole aus der japanischen Sprache (Skrandies und Shinoda, 2012, Shinoda und Skrandies, 2013). Diese stehen für einzelne Worte und werden durch verschiedene Striche zum Ausdruck gebracht. Abbildung 5 zeigt ausgewählte Beispiele.

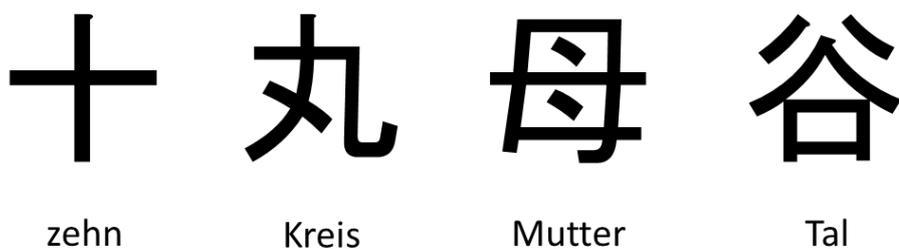


Abbildung 5 – Beispiele für Kanji-Symbole, jeweils eines pro Kategorie. Von links nach rechts: Zahl, Eigenschaft, Leben, Natur.

Skrandies und Shinoda (2012) konnten in diesem Vorgängerexperiment beobachten, dass nahezu alle Versuchspersonen in der Lage waren, sich in etwa 20 Minuten 20 japanische Schriftzeichen zu merken und nach weiteren ca. 20 Minuten korrekt ins Deutsche zu übersetzen. Dies ließ den Schluss zu, dass die zu erwartende maximale

Merkfähigkeit im Durchschnitt unter diesen Bedingungen bei deutlich über 20 richtigen Antworten liegen musste.

Aus diesem Grund war es für dieses Experiment nötig, die Schwierigkeit der Aufgabe für die Versuchspersonen zu erhöhen, so dass eine bessere Diskriminierung der unterschiedlichen Leistungen möglich würde. Schließlich entschied man sich dafür, die Anzahl der Zeichen auf insgesamt 40 zu lernende Symbole mit vergleichbarem Komplexitätsgrad zu erhöhen. Dies wurde erreicht, indem von einem muttersprachlich-japanischen Gastforscher die Zeichen hinsichtlich der Anzahl der in der Schriftsprache benutzten Striche und ihrer Bedeutungskategorien kontrolliert wurden. Diese Kategorien waren Zahl (z.B. „fünf“), Eigenschaft (z.B. „wenig“), Leben (z.B. „Mutter“) und Natur (z.B. „Felsen“). Für die elektrophysiologischen Messungen wurden alle benutzten Wortklassen zur Erhöhung der Datenqualität zusammengefasst. Im Endeffekt wurde jeder Versuchsperson zum Lernen jeweils eine zweiseitige Liste einmalig zufällig sortierter Kanji-Symbole mit jeweils zehn Stück aus jeder Kategorie und deren deutscher Übersetzung dargeboten („Liste A“). Hierbei wurden durch die Randomisierung 4 Zeichen aus Kategorie A, 6 Zeichen aus B, 6 Zeichen aus C und 4 Zeichen aus D auf Seite 1 platziert. Beim Abrufen der Erinnerungsinformation, dem so genannten „Vokabeltest“, wurden die gleichen Symbole, aber ohne Übersetzung und in anderer Reihenfolge, vorgelegt („Liste B“). Die Teilnehmer sollten im Freitext die deutsche Bedeutung neben das Symbol schreiben. In dieser Liste entfielen 6 Zeichen aus Kategorie A, 5 Zeichen aus Kategorie B, 6 Zeichen aus Kategorie C und 3 Zeichen aus Kategorie D auf die erste Seite. Auf den Seiten 124 bis 126 im Anhang finden sich Beispiele für die benutzten Listen, sowie eine Aufstellung aller verwendeten Symbole und ihrer Zugehörigkeit zu den Kategorien.

Der Vorversuch – ein reines Verhaltensexperiment

Versuchspersonen im Vorversuch

Insgesamt 32 Studentinnen und Studenten wurden vom Untersucher für den Vorversuch über Aushänge und die universitätsinterne Email-Mitteilung angeworben. Einzelne waren persönliche Bekannte. Eine Beschränkung der Anzahl an Frauen und Männern erfolgte nicht. Bei Bedarf wurde der Zeitaufwand bescheinigt, monetäre Entschädigungen gab es jedoch nicht. Als Indikator für eine ausreichende Kooperationsbereitschaft oder Aufmerksamkeit wurde definiert, dass beim Ausfüllen des Testbogens mindestens 20 der 40 Antwortfelder eine Antwort enthalten mussten. Eine Probandin erreichte dieses Kriterium nicht, weshalb man sie von der Datenanalyse ausschließen musste (ID: VP-A-27).

Alle eingeschlossenen Versuchspersonen (Gesamtkollektiv)
n=81

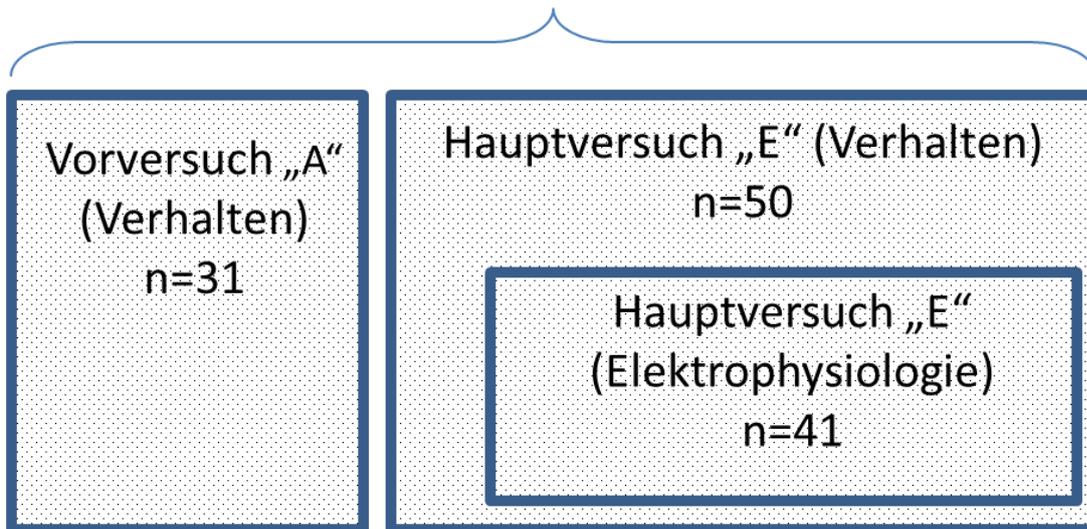


Abbildung 6 – Ein Schema über die Versuchspersonenkollektive. Man beachte, dass Haupt- und Vorversuch grundsätzlich zwei getrennte Versuche sind. Im Vorversuch, der ein reines Verhaltensexperiment war, wurden $n=31$ Personen berücksichtigt. Im Hauptversuch, in dem bei allen Teilnehmern zusätzlich elektrophysiologische Messungen durchgeführt wurden, waren zunächst nach Ausschluss unbrauchbarer Versuchspersonen $n=50$ Datensätze verfügbar. Davon mussten aber nach elektrophysiologischen Kriterien weitere neun exkludiert werden, sodass bei der Analyse der evozierten Potentiale $n=41$ Versuchspersonen berücksichtigt wurden. Das „Gesamtkollektiv“ ($n=81$) umfasst die Verhaltensdaten beider Experimente.

Schließlich standen 31 Datensätze zur Verfügung (siehe auch Abbildung 6 für eine Übersicht). 15 der darin inbegriffenen Teilnehmer studierten Humanmedizin, sechs Psychologie, acht ein Fach der Ernährungs-, Gesundheits- oder Sportwissenschaften, der Rest Sonstiges. Zwei Probanden verfügten zusätzlich über eine Berufsausbildung. Das mittlere Alter lag bei 23,3 Jahren ($SD = 3,77$ Jahre). Bis auf zwei Versuchspersonen (6,5%), die Russisch als Muttersprache angaben, hatten alle Deutsch als Muttersprache oder waren bilingual. Alle beherrschten mindestens eine weitere Sprache, 15 Personen sogar zwei oder mehr Fremdsprachen, aber keiner Japanisch oder Chinesisch. Von den Teilnehmern rauchten 16,1% (5 aus 31), 23 waren weiblich (74,2%). Die Händigkeit wurde standardmäßig mit dem Edinburgh-Inventory nach Oldfield (1971) erfasst. Danach haben zwei Linkshänder teilgenommen. Keine Versuchsperson gab an, sonderlich schlecht gelaunt zu sein: Auf einer Skala von 1 (schlechteste) bis 10 (beste) werteten sie ihre „Allgemeine Laune“ bzw. das Befinden im Mittel auf 7,97 ($SD = 1,49$)

Eine Versuchsperson aus der Gruppe „kongruent“ (2 x Zitrone) nahm gar keinen besonderen Geruch wahr, gab aber keine Erkältung oder sonstige mögliche

gesundheitliche Erklärungsmöglichkeiten an. Zwei Teilnehmer aus der Gruppe „geruchlos“ glaubten hingegen, etwas zu riechen. Einmal wurde dies mit „Blumen“ beschrieben, die zweite Person machte keine Angabe.

Versuchsablauf

Mit jedem und jeder Freiwilligen wurde zumeist per E-Mail ein Termin im Physiologischen Institut vereinbart. Aus ökonomischen Gründen fasste man zum Teil mehrere zu Kleingruppen mit höchstens vier Personen zusammen. Ferner wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer gebeten, eine Stunde vor dem Versuch nicht zu rauchen, zu essen, Kaffee zu trinken, Deodorant anzuwenden oder andere geruchs- oder geschmacksintensive Substanzen anzuwenden.

Im Gegensatz zum Hauptexperiment erfolgte daher auch keine randomisierte, sondern eine willkürliche Zuteilung der Versuchspersonen in eine der drei Gruppen. Darüber, ob und welcher Geruch dargeboten würde, wurde auch auf Nachfragen keine Auskunft erteilt. Eine einseitige Verblindung war somit gewährleistet.

Alle Versuchspersonen wurden zunächst begrüßt und über Sinn und Zweck des Experimentes, sowie über mögliche Gefahren aufgeklärt. Hierzu zählten besonders mögliche, aber sehr unwahrscheinliche allergische Reaktionen. Danach händigten wir ihnen einen Fragebogen und ein Formular zur Einverständniserklärung aus. Der erste Teil des Fragebogens (Seiten 1-3) war vor dem Lernen zu beantworten. Er enthielt neben den weiter oben geschilderten Standardfragen (Alter etc.) einen Test zur Händigkeit, Fragen zu Allergien, Operationen, Medikamenteneinnahmen und eine Einschätzung der eigenen allgemeinen Befindlichkeit („Wie geht es Ihnen heute?“) auf einer diskreten Ordinalskala von 1-10 (10 = extrem gut). Ferner erbaten wir eine Information über den Raucherstatus, auch wenn der Einfluss des Raucherdaseins auf die Geruchsschwelle nicht vordergründig erscheint (Bensafi et al., 2002, S. 338). Außerdem baten wir Frauen anzugeben, ob sie zur gegebenen Zeit eine hormonale Kontrazeption durchführten und in welchem Tag ihres Monatszyklus sie sich (etwa) befänden. Die ursprüngliche Entscheidung zum Einschluss dieses Aspektes beruht auf der Diskussion einiger Autoren bezüglich des Einflusses des Menstruationszyklus auf die olfaktorische Wahrnehmung (Hummel et al., 1991) oder die Komponenten visuell evozierter Potentiale (Avitabile et al., 2007).

Sobald die Teilnehmer bereit waren, wurden sie in einen kleineren, gut beleuchteten Raum geführt. Die Bestückung des Lüfters mit Wasser, Zitronenöl oder Fichtennadelöl (s. „Geruchsbedingungen“) erfolgte entweder in diesem Moment oder kurz davor,

sodass die Versuchspersonen dessen zweiminütige Inbetriebnahme immer miterleben konnten. Anschließend wurden die Versuchspersonen instruiert, die jeweils bereitliegende, zweiseitige, Vokabelliste („Liste A“) mit 40 Kanji-Symbolen in Zufallsreihenfolge in 20 Minuten von Japanisch nach Deutsch auswendig zu lernen. Das Ziel sei es dabei, später in der Lage zu sein, die Symbole zu erkennen und die deutsche Bedeutung daneben zu schreiben. Um verschiedenen Lerntypen Rechnung zu tragen, erfolgte stets der Hinweis, man dürfe die zur Verfügung stehenden Stifte nutzen, um Notizen oder Zeichnungen anzufertigen, sofern man dies wünsche. Nicht alle Versuchspersonen haben diese Möglichkeit genutzt.

Nach Ablauf der Lernzeit von 20 Minuten wurden die Versuchspersonen wieder gebeten, den Raum zu verlassen. Währenddessen wurde durch das Öffnen der großen Fenster gut gelüftet. In der Zwischenzeit verwickelte der Versuchsleiter die Teilnehmer in Gespräche oder zeigte ihnen das neurophysiologische Labor, um deren selbstständige Wiederholungsversuche zu unterbinden.

Die anschließende Testphase fand wieder im gleichen Raum statt. Nach einer erneuten Inbetriebnahme des Lüfters mit Applikation einer Substanz je nach Geruchsbedingung erhielten die Damen und Herren maximal zehn Minuten Zeit, um „Liste B“, den so genannten „Vokabeltest“, auszufüllen.

Abschließend war nur noch Seite 4 des Fragebogens zu vervollständigen. Darin sollten Versuchspersonen Angaben über eventuelle Auffälligkeiten machen und für den Fall einer besonderen Geruchswahrnehmung eine Aussage darüber treffen. Hierbei wurde zwischen der Test- und der Lernphase differenziert und eine subjektive Beurteilung darüber abgegeben, wie angenehm der Geruch empfunden worden war. Dazu diente wieder eine Skala von 1-10 (10 = extrem gut). Des Weiteren baten wir um eine Einschätzung, welcher Geruch in welcher Phase vorhanden gewesen sein könnte. Wenn die Teilnehmer es wünschten, konnten sie vor der Verabschiedung noch ihre eigene Leistung erfahren.

Der Hauptversuch (evozierte Potentiale)

Ziel des Versuches war es, die einzelnen Symbolkategorien (s.u.) hinsichtlich elektrophysiologischer Unterschiede zwischen den Geruchsbedingungen (Versuchspersonengruppen) zu untersuchen. Hierzu sollten die Latenz einzelner Komponenten, deren Lokalisation und die globale Feldstärke (GFP) analysiert werden.

Versuchspersonen

Die Akquise von Freiwilligen erfolgte wie im Vorversuch. Auch für diesen Versuchsteil wurde keine finanzielle Aufwandsentschädigung bezahlt. Sofern dies aber gewünscht wurde, stellten wir Teilnahmebescheinigungen aus, die zum Nachweis abgeleiteter Pflicht-Versuchspersonenstunden in einigen Studiengängen benutzt werden konnten.

Versuchspersonen (für die Auswertung der Verhaltensdaten)

Mindestvoraussetzung für die Teilnahme war ein im Labor gemessener beidäugiger Visus von mindestens 0,8. Wegen der Verwendung schwarz-weißer Symbole war ein uneingeschränktes Farbsehen nicht zwingend notwendig, weshalb eine Versuchsperson mit gestörter Rot-Grün-Wahrnehmung dennoch zugelassen wurde. Ferner sollten Versuchspersonen keine Psychopharmaka einnehmen müssen und ebenso wenig an neurologischen oder psychiatrischen Erkrankungen mit eventuellen EEG-Veränderungen leiden. Durch die letztgenannte Regelung mussten die Versuchspersonen VP-E-40 und VP-E-8 von der Datenanalyse ausgeschlossen werden, allerdings ohne vorherige Kenntnis der elektrophysiologischen Daten. Wegen des Nichterreichens des Kooperations-Kriteriums, höchstens 20 Felder im Vokabeltest frei zu lassen, mussten weitere zwei Teilnehmer (VP-E-10 und -30) exkludiert werden. Proband VP-E-49 hatte die Lernaufgabe falsch verstanden und war somit ebenfalls unbrauchbar. Wegen des hervorstechenden Alters und der hohen Artefaktbeladung entschlossen wir uns auch dazu, VP-E-33 zu ignorieren. Hier hatte ebenfalls vor der Entscheidung zum Ausschluss keine Sichtung der Ergebnisse stattgefunden.

In die Auswertung der Verhaltensdaten gingen daher 50 Datensätze ein (siehe auch Abbildung 6 auf Seite 35 für eine Übersicht).

Innerhalb dieses Kollektivs lag das mittlere Alter bei 22,94 Jahren (SD = 3,33 Jahre). 22% waren Raucher. 10% Linkshänder. Die „Allgemeine Laune“ lag bei 7,5 (SD=1,92) auf der Skala von 1 (schlechteste) bis 10 (beste). Die Zeit zwischen dem Ende des Lernens und dem Beginn des Tests betrug im Mittel 41,82 Minuten (SD = 5,93 min).

Sechs Personen hatten Fachhochschulreife, der Rest die Allgemeine Hochschulreife. Sieben studierten Humanmedizin, 16 Psychologie, der Rest verteilte sich auf Betriebswirtschaftslehre, Lehramt, Bewegung und Gesundheit und sonstige. Eine Versuchsperson hatte ihr Studium bereits abgeschlossen. Vier Personen gaben an, Russisch zwar offiziell als Muttersprache zu führen, jedoch Deutsch gleich gut oder besser zu sprechen. Eine Teilnehmerin, die hoch eloquent Deutsch sprach, gab

Pakistanisch an. Diese wurden zufällig alle der Gruppe „kongruent“ zugewiesen. Lediglich ein Freiwilliger sprach keine Fremdsprachen.

Die relative Luftfeuchtigkeit betrug im Mittel 37,1% (SD=9,83%) und bewegte sich zwischen 22% und 59%. 24,5°C (SD=1,65°C) war die mittlere Temperatur der Raumluft, die Werte von 19,9°C bis 27,9°C annahm.

Alle Versuchspersonen nahmen zumindest in einer von beiden Versuchsphasen korrekt wahr, wenn ihnen ein Duft dargeboten wurde und/oder äußerten nach dem Experiment eine adäquate Vermutung über dessen Qualität, sodass von einer ausreichenden olfaktorischen Funktion bei allen Versuchspersonen auszugehen ist. Interessant ist, dass auch hier zwei Teilnehmer der Gruppe „geruchlos“ angaben, „Salz“ bzw. „Parfüm“ zu riechen.

Versuchspersonen (Elektrophysiologie)

Wegen technischer Probleme oder nicht korrigierbaren Artefakten konnten die Versuchspersonen VP-E-4, 6, 11, 31, 34, 39, 44, 46, 53 zusätzlich zu jenen, die schon auf der Verhaltensebene ausgeschlossen waren, nicht in die Analyse einfließen.

In die Auswertung der evozierten Potentiale gingen daher 41 Datensätze ein (siehe auch Abbildung 6 auf Seite 35 für eine Übersicht).

Das mittlere Alter betrug 23,2 Jahre (SD=3,54; min. 19, max. 33 Jahre). Sechs Personen hatten Fachhochschulreife, der Rest die Allgemeine Hochschulreife. Sechs studierten Humanmedizin, dreizehn Psychologie, der Rest verteilte sich auf Betriebswirtschaftslehre, Lehramt, Bewegung und Gesundheit und sonstige. Eine hatte ihr Studium bereits abgeschlossen. Drei Linkshänder wurden mit erfasst (zwei in der Gruppe „geruchlos“, einer in der Gruppe „kongruent“). Elf Raucher nahmen teil (27%).

Hinsichtlich der Muttersprache ergaben sich die gleichen Besonderheiten wie im Verhaltenskollektiv, da die entsprechenden Versuchspersonen auch nach Überprüfung der Einschlusskriterien erhalten blieben.

Die relative Luftfeuchtigkeit bewegte sich zwischen 22% und 59% (Mittelwert=37,63%; SD=10,2%). Die Temperatur lag im Mittel bei 24,56°C (SD=1,58°C; min=19,9°C; max=27,9°C)

Versuchsablauf

Vorbereitungen

Auch hier wurde mit jedem und jeder Freiwilligen zumeist per E-Mail ein separater Termin im Physiologischen Institut vereinbart. Im Vorfeld wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer wiederum gebeten, eine Stunde vor dem Versuch nicht zu rauchen, zu essen, Kaffee zu trinken, Deodorant anzuwenden oder andere geruchs- oder geschmacksintensive Substanzen anzuwenden. Dies diente dazu, möglichst Beeinträchtigungen des Geruchssinnes, zum Beispiel durch Kreuzadaptation, zu vermeiden.

Im Gegensatz zum Vorexperiment erfolgte eine randomisierte Zuteilung der Versuchspersonen in eine der drei Gruppen. Konkret bestand das Verfahren darin, dass dem Untersucher im Vorfeld für jedes Geschlecht eine zufallsverteilte Liste vorlag, welche die Gruppenzugehörigkeit nach der Reihenfolge der Messtermine regelte. Ursprünglich sollte so eine gleichmäßige Verteilung von Frauen und Männern gewährleistet sein. Verzerrungen entstehen ggf. durch technisch mangelhafte Messergebnisse oder Fehler einzelner Versuchspersonen, die dann ausgeschlossen werden müssen. Darüber, ob und welcher Geruch dargeboten würde, wurde auch auf Nachfragen keine Auskunft erteilt. Eine einseitige Verblindung war somit auch hier gewährleistet.

Beim Eintreffen wurden die Versuchspersonen zunächst freundlich begrüßt und über den Zweck des Versuches und daraus resultierende Gefahren informiert. Neben dem kleinen Risiko einer allergischen Reaktion auf einen möglicherweise dargebotenen Geruchsstoff klärte der Untersucher über die eher hypothetische Möglichkeit eines Schadens durch Gerätedefekt auf. Ferner waren Versuchspersonen auch darüber im Bilde, dass sie einen Teil der dargebotenen Zeichen später für einen abschließenden Test lernen sollten. Anschließend sollten sie dann die ersten drei Seiten des Fragebogens inklusive der Einverständniserklärung im Sinne eines „informed consent“ ausfüllen. Er enthielt die gleichen Fragen wie das Formular im Vorversuch (s. hierzu „Vorversuch – Versuchsablauf“). Dabei räumten wir jetzt auf Grund der Erfahrung im Vorexperiment für Damen auch die Antwortmöglichkeit „zur Zeit kein Zyklus“ ein.

Wie auch im Vorversuch wurde zwar gesagt, dass möglicherweise ein Geruch dargeboten würde, nicht jedoch, ob und welcher dies sein könnte.

Danach nahmen der Versuchsleiter die Visusprüfung mit Landolt'schen Ringen auf einer Entfernung von 6 m vor. Ebenso erfolgte eine orientierende Prüfung des Farbsehvermögens anhand einiger Ishihara-Tafeln.

Denkaufgabe

Als Nächstes wurden die Versuchspersonen wie im methodisch-technischen Abschnitt erläutert für die EEG-Erfassung vorbereitet. Unterdessen erfolgte eine Einweisung in eine so genannte Denkaufgabe, die während der Darbietung der Kanji-Symbole einen Aufmerksamkeitsverlust oder ein Abschweifen der Versuchsperson verhindern sollte. Aus den Kontrollreizen, d.h. den später nicht erlernten, war aus drei unterschiedlichen Kategorien jeweils einer selektiert worden, der anderen Symbolen nicht allzu ähnlich ist und markant erscheint. Dies waren die Zeichen Nr. 78 („Regen“, Kategorie D), Nr. 73 („Feder“, Kategorie C) und Nr. 61 („stehen“, Kategorie B). Zusätzlich noch ein viertes Zeichen aus Kategorie A zu verwenden erschien uns für die Versuchspersonen zu komplex.

Diese drei „Marker-Symbole“ sollten die jeweils dargebotenen Abfolgen von 80 Zeichen in vier zufällig große Intervalle unterteilen. Dabei war es die Aufgabe der Versuchspersonen, die Anzahl der Reize zu zählen, die in diesen Intervallen vorkamen. Die drei ausgewählten Symbole waren als letztes Zeichen eines Intervalls mitzuzählen. Es war also zunächst erforderlich, sich diese drei Kontrollsymbole gut einzuprägen. Bezüglich der Durchführung wurden die Teilnehmer konkret instruiert, zunächst aufmerksam auf das Erscheinen des ersten Markers zu achten und das erste Intervall nicht zu zählen. Danach sollte sie in Gedanken beim nächsten Zeichen mit dem Zählen beginnen und alle weiteren Stimuli einschließlich des zweiten „Markers“ mitzählen. Folglich wurde das nächste Intervall wieder mit „eins“ begonnen. Nach dem letzten Marker wurde dann bis zum Ende der Darbietung durchgezählt. Eine schematische Darstellung des hier geschilderten Ablaufs findet sich in Abbildung 7. Somit war es durch die Nennung der Intervalle durch die Versuchsperson im Anschluss an die 80 Sekunden Darbietungszeit möglich, deren Aufmerksamkeit, Kooperationsbereitschaft und Konzentrationsfähigkeit zu prüfen. Bis auf wenige Versuchspersonen beherrschten die meisten das Prinzip schon nach kurzer Zeit. Die Ergebnisse dieser Aufgabe wurden allerdings nicht weiter ausgewertet.

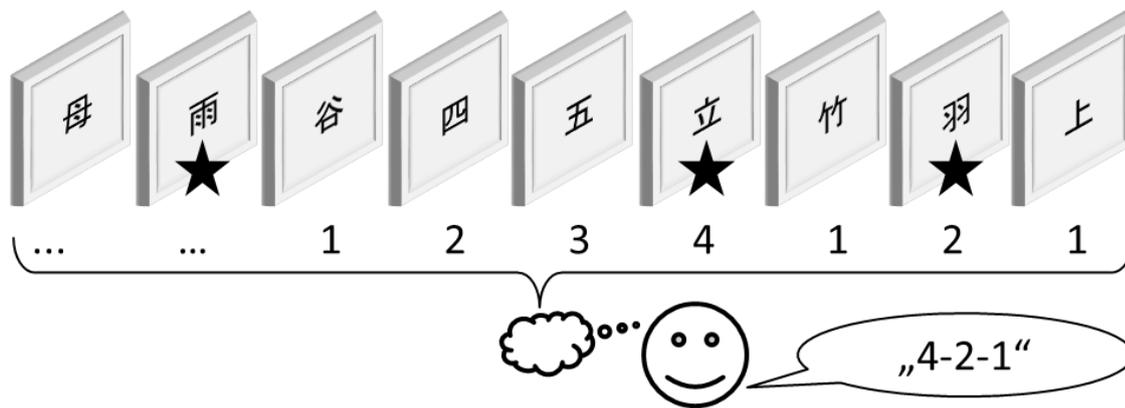


Abbildung 7 – Schematische Darstellung der „Denkaufgabe“. Die im Versuch je Durchlauf tatsächlich benutzten 80 Symbole wurden hier zur Vereinfachung auf neun reduziert. In der oberen Reihe sind die jeweils sekundlich dargebotenen Zeichen in einer fiktiven Reihenfolge von links nach rechts abgebildet, in der mittleren die gedankliche Zählweise der erdachten Versuchsperson und in der unteren die nach dem Ende des Durchlaufes abgegebene verbale Antwort. Die Versuchsperson merkte sich drei bestimmte Zeichen, die für jeden Durchlauf gleich blieben. Diese stellten Markierungen dar, die als Abschluss zu zählender Intervalle dienten. Diese „Marker“ sind in der Abbildung mit Sternen hervorgehoben. Am Anfang wurde nicht gezählt, sondern nur auf das Auftauchen des ersten Markers geachtet. Nach diesem wurde mit „eins“ begonnen und bis einschließlich dem nächsten Marker weiter gezählt. Diese Prozedur wiederholte sich bis zum Schluss, d.h. bis zur Beendigung des Durchlaufes.

Erste Geruchsphase und Lernen

Nach Abschluss der Vorbereitungen wurden die Versuchspersonen durch den Versuchsleiter in den Messraum geführt. Die erstmalige Bestückung des Lüfters mit Wasser, Zitronenöl oder Fichtennadelöl (s. unter Geruchsbedingungen) erfolgte entweder in diesem Moment oder kurz davor, sodass die Versuchspersonen dessen zweiminütige Inbetriebnahme immer miterleben konnten.

Als erstes wurden von jeder Versuchsperson Schachbrett-VEPs erfasst, wie es auch Abbildung 3 zu entnehmen ist. Diese sind gründlich erforscht und eignen sich sehr gut dazu, krankhafte Veränderungen oder technische Abweichungen zu erkennen (Aminoff und Goodin, 1994). Genauer gesagt handelte es sich um „Schachbrett-Umkehrungen“ („checkerboard reversals“). Dies bedeutet, dass der Proband vor sich ein Schachbrettmuster sieht, dessen Felder in einem bestimmten Takt zwischen weiß und schwarz wechseln. Hierbei erfolgte eine beidäugige Stimulation zunächst des linken, dann des rechten sowie abschließend beider Gesichtsfelder. Währenddessen sollten die Teilnehmer entspannt in die Mitte des Bildschirms auf einen kleinen schwarzen Kreis blicken, in dem gelegentlich einzelne Ziffern von 0 bis 9 gezeigt wurden. Unter anderem um Blickbewegungen zu vermeiden wurde die Versuchsperson gebeten, diese Ziffern zu addieren und am Schluss des Durchganges das Ergebnis zu nennen.

Die genauen technischen Angaben sind dem Abschnitt „Schachbrettmuster“ auf Seite 46 zu entnehmen.

Nach Abschluss der Erfassung der Schachbrettmuster-VEPs wiederholte der Untersucher die Arbeitsanweisung für die „Denkaufgabe“ (siehe S. 41) und gab bei Bedarf dem Teilnehmer noch einmal kurz Gelegenheit, sich die Marker-Zeichen einzuprägen. Sobald beide Parteien bereit waren, begann die Darbietung der japanischen Symbole. Je Durchgang wurden alle 40 Test- und alle 40 Kontrollreize anhand einer randomisierten Liste für jeweils eine Sekunde ohne Interstimulusabstand gezeigt. Sofort im Anschluss an jede Liste sollte der Teilnehmer seine gezählten Intervallgrößen nennen. Auch wenn keine reguläre Pause an dieser Stelle vorgesehen war, konnten Probanden eine solche einfordern. Nach jeweils fünf Durchgängen verhängte der Untersucher von sich aus eine kurze, etwa einminütige Pause. Insgesamt wurden in der Lernphase 15 Listen auf diese Art präsentiert, was einer Gesamtzahl von 1.200 EEG-Segmenten entspricht. Auf jede Zeichen-Kategorie entfielen daher 150 Einzeldarbietungen.

Nach einer erneuten Bestückung und Aktivierung des Lüfters wurden die Versuchspersonen instruiert, die jetzt bereitliegende, zweiseitige Vokabelliste („Liste A“, siehe Anhang, S. 123) mit 40 Kanji-Symbolen in Zufallsreihenfolge in 20 Minuten von Japanisch nach Deutsch auswendig zu lernen. Das Ziel sei es dabei, später in der Lage zu sein, die Symbole zu erkennen und die deutsche Bedeutung daneben zu schreiben. Um verschiedenen Lerntypen Rechnung zu tragen, erfolgte stets der Hinweis, man dürfe die zur Verfügung stehenden Stifte nutzen, um Notizen oder Zeichnungen anzufertigen, sofern man dies wünsche. Auch hier haben nicht alle Versuchspersonen diese Möglichkeit genutzt.

Sofort nach Beendigung des Lernvorganges erhielt die Versuchsperson dann die Möglichkeit zum Aufsuchen der Waschräume und wurde aufgefordert, den Raum zu verlassen und sich ein wenig zu bewegen. Zwischenzeitlich lüftete der Durchführende den Raum mit Hilfe der installierten Lüftung und eines mobilen Standventilators der Fa. BUDGET für etwa fünf Minuten. Dieses Verfahren kam immer zur Anwendung, auch wenn kein Geruch appliziert worden war (Geruchsbedingung „geruchlos“).

Zweite Geruchsphase und Test

Wenn die Beteiligten wieder bereit waren, wurde die Versuchsperson aufgefordert, in der Messkammer wieder ihren Platz einzunehmen. Zwischenzeitlich bestückte man den Lüfter entsprechend der Versuchsbedingung. Nach dessen Laufzeit wurde die

Erfassung der Kanji-VEPs auf exakt die gleiche Weise wie in der Lernphase wiederholt.

Ebenso wie in der Lernphase nahm der Untersucher den Lüfter nach Abschluss der Datenerfassung entsprechend bestückt erneut in Betrieb. Gleich im Anschluss wurde dem Teilnehmer der so genannte „Vokabeltest“ („Liste B“) gebracht, der innerhalb von zehn Minuten auszufüllen war. Weitere Vorgaben, z.B. bezüglich des Erratens von Antworten, wurden nicht gemacht. Da aus praktischen Gründen ein konstantes Latenzintervall zwischen Lernen und Test unter den EEG-Bedingungen einzuhalten unmöglich war, wurde die Zeit zwischen dem Ende des Lernens und dem Beginn des Tests je Proband notiert.

Nachbereitung

Sofort nach Abschluss des Experiments baten wurden die Teilnehmer aus der Messkammer herausgebeten, um Seite vier des Fragebogens auszufüllen (siehe Anhang, S. 124). Man hatte sie in diesem Versuchsteil explizit dazu aufgefordert, für jede der beiden Phasen, d.h. Test und Lernen, eine Bewertung des Umgebungsgeruches im Allgemeinen vorzunehmen, weil manchmal im Vorversuch keine Antwort gegeben worden war. Analog zum Vorversuch kam hier die Skala von 1-10 zum Einsatz (10 = extrem angenehm). Ziel dieser Maßnahme war es, eine Evaluation der neutralen Kontrollbedingung zu erhalten und zu erreichen, dass jede Versuchsperson eine Bewertung abgibt, auch wenn sie nichts wahrgenommen hatte. Unabhängig davon wurde getrennt für beide Versuchsphasen gefragt, ob den Teilnehmern ein besonderer Geruch aufgefallen sei. Wenn ja, sollten sie eine Einschätzung abgeben, um welchen es sich gehandelt haben könnte. Allerdings fanden Bensafi et al. (2002) keine Hinweise darauf, dass das Bewusstsein, einen besonderen Geruch wahrzunehmen, einen Einfluss auf elektrophysiologische Variablen, subjektive Beurteilung von Stimuli oder Antwortzeiten hat.

Messung evozierter Potentiale

Zur Messung der durch die Wahrnehmung japanischer Symbole hervorgerufenen evozierten Potentiale erfolgte die Darbietung dieser Symbole während der Registrierung der Gehirnströme. Eine Einteilung der Symbole wurde sowohl anhand ihrer Bedeutungskategorie (s.u.) vorgenommen als auch danach, ob sie im Verlauf des Experimentes gelernt würden, oder nicht (Kontrollreize vs. Testreize).

Allgemein

Zur Darbietung der visuellen Stimuli diente ein Bildschirm des Typs ELSA Ecomo 24H96. Leuchtdichtemessungen erfolgten mit einem MINOLTA Luminance Meter 1°. In allen Versuchsbedingungen wurde die relative Luftfeuchtigkeit und –temperatur mit dem kombinierten Hygro-/Thermometer „Humidity Alert II“ der Firma Extech Instruments gemessen.

Elektrodenpositionen und EEG-System

Zur Registrierung des Elektroencephalogramms benutzte man eine hauseigene Elektrodenanordnung mit 30 Elektrodenpositionen in einem Netz, von denen eine als Referenz dient. Eine schematische Darstellung mit den verwendeten Koordinatensystemen findet sich in Abbildung 8. Mit Elektrodenhauben oder -netzen sind recht genaue Positionierungen möglich, wobei allerdings zumindest einige Elektroden mit Messverfahren geprüft werden sollten (Michel et al., 2009, S. 86). In diesem Fall wurden der Abstand der vorderen und hinteren Elektrodenreihen zum Nasion, bzw. Inion manuell gemessen. Die Erfassung erfolgte zunächst mit 29 Elektroden gegen die Referenzelektrode (s.u.), während die spätere Auswertung im Sinne einer Mittelwert-Referenz („average reference“) gegen den Mittelwert aller 30 EEG-Kanäle erfolgte. Die hiesige Elektrodenanordnung orientierte sich an der Sagittallinie, beginnt bei 15% des Abstandes zwischen der Nasenwurzel und der Protuberantia occipitalis externa (Nasion-Inion-Abstand, NIA) und endet bei 90%. Dazwischen sind alle Elektroden mit jeweils 15% Abstand äquidistant verteilt. Die Referenzelektrode befindet sich in der Sagittallinie bei 45% und damit 5% weiter anterior als Cz im internationalen 10-20-System (Jasper, 1958). Dort befinden sich die Elektroden der Sagittallinie bei 30% NIA (Fz), 50% (Cz) und 70% (Pz), während sie hier bei 15, 30, 45, 60, 75 und 90% lagen. Die Vorbereitung der Haut erfolgte zwecks Entfettung zunächst mit alkoholgetränkten Watteträgern, anschließend mit dem abrasiven Elektrodengel „Abralyt 2000“ der Firma Easycap GmbH. Die Elektroden wurden dann mit üblichen Adaptern an einer EEG-Haube der Fa. Easycap GmbH befestigt. In Verwendung befanden sich gesinterte Silber/Silberchlorid-Ringelektroden mit 2 mm Anschluss.

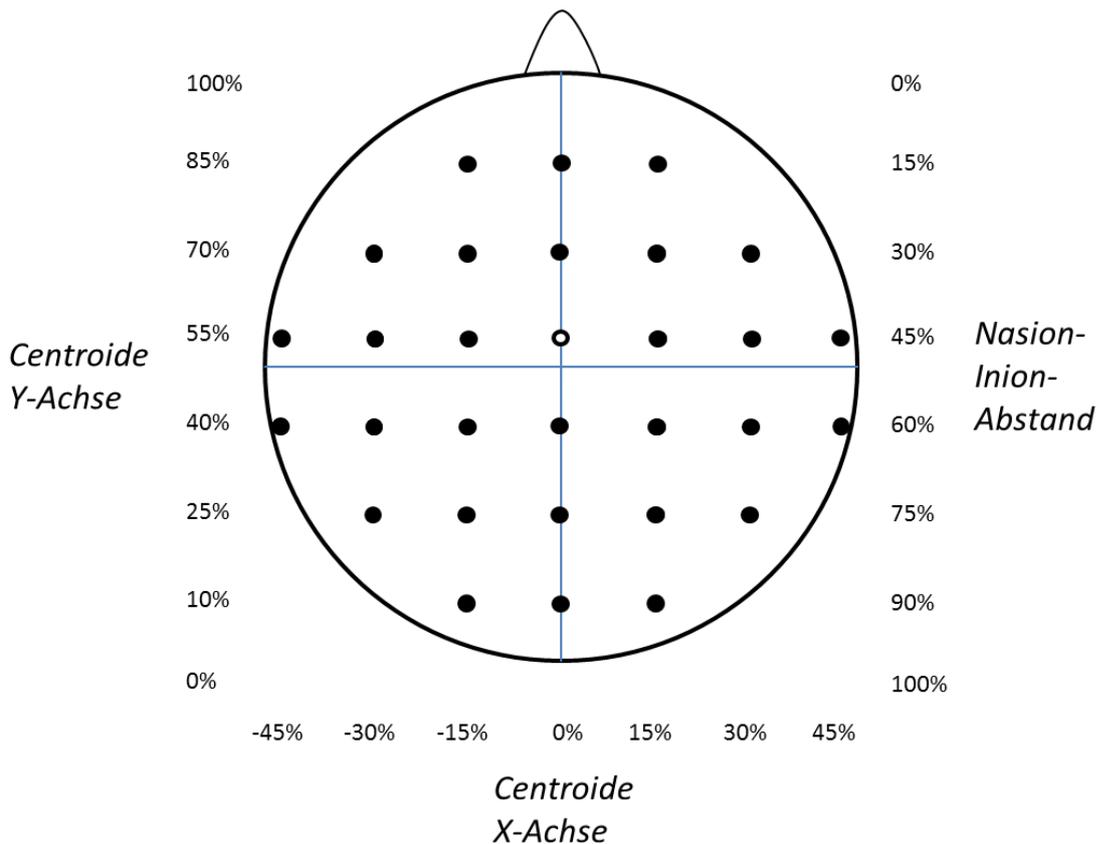


Abbildung 8 – Schematische Darstellung der Positionen der Elektroden. Sie sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet, die zunächst als Referenz benutzte Position mit einem Kreis. Am rechten Rand ist die Position der mittleren Elektrode der entsprechenden Reihe auf der Strecke Nasion-Inion angegeben. Als Orientierung und zum Vergleich hierzu sind die Raumachsen der bei der Auswertung benutzten Centroide am linken und unteren Rand aufgetragen. Mehr zu Centroiden siehe S. 51 ff.

Außerdem erfasste das System mit zwei separaten Kanälen supra- und infraorbital des rechten Auges Blinzelbewegungen. Als Verstärker diente ein „Braintronics Control-1032“ mit einer Digitalisierungsrate von 500 Hz. Ferner nutzten wir die elektrischen Filtereinstellungen Hochfrequenzfilter („lowpass“) mit 70 Hz und Zeitkonstante („highpass“) mit $\tau = 0,3$ s (Grenzfrequenz 0,53 Hz), beides mit einer Filtersteilheit von 24 dB/Oktave. Als Richtwert galt zudem der Grundsatz, dass keine Elektrode mehr als 50 kOhm Impedanz erreichen sollte.

Die Registrierung des Elektroencephalogramms, der Blinzelartefakte, sowie der digitalen Markierungen der Stimulus-Darbietungen erfolgte durch ein laboreigenes Programm für die Programmierumgebung LAB VIEW.

Schachbrettmuster

Der Abstand der Versuchsperson zum Bildschirm betrug 110 cm. Die Schachbrettmustergröße war bei einer Feldgröße von 1,5 cm x 1,5 cm damit 0,78°, d.h.

46,8 Winkelminuten. Die zur Präsentation benutzte Bildschirmfläche war 30,5 cm x 47,5 cm groß, was ca. 15,8° x 24,4° entspricht. Weiße Schachbrettfelder zeigten im Mittel eine Luminanz von 63,28 cd/m² (Candela pro Quadratmeter), während bei schwarzen im Mittel 2,49 cd/m² gemessen wurden. Somit lag die mittlere Leuchtdichte der Schachbrettmuster bei 32,9 cd/m² (Aminoff und Goodin, 1994). Der Leuchtdichteunterschied (Kontrast) betrug 92,4% $[(L_{\text{hell}} - L_{\text{dunkel}}) / (L_{\text{hell}} + L_{\text{dunkel}})] \times 100$. Bei Stimulation in nur einer Hälfte des Gesichtsfeldes (und damit der kontralateralen Retinahälfte) wurde auf der anderen Seite ein stehendes Zufallsmuster aus schwarzen Punkten auf weißem Grund gezeigt, dessen Luminanz bei 23,6 cd/m² lag. Ein Kontrastwechsel erfolgte alle 400 ms (2,5 Wechsel / s)

Kanji-Symbole

Die japanischen Zeichen erschienen auf einer weißen Fläche mit den Abmessungen 31,0 cm x 21,7 cm. Diese hatte eine mittlere Leuchtdichte von 69,0 cd/m².

Die Teststimuli, d.h. die 40 Kanji-Zeichen die von den Versuchspersonen gelernt werden sollten, hatten eine mittlere Höhe von 19,3 mm und eine mittlere Breite von 18,5 mm. Für die Kontrollstimuli waren diese Maße 19,2 mm x 18,5 mm. Daraus ergibt sich für die Versuchsperson ein mittlerer Objektwinkel von 1,0° in der Höhe und 0,96°, d.h. 57,82', in der Breite.

Durch die unterschiedliche Anzahl und Dicke der Striche bei dieser Art von Stimuli gestaltet sich die Messung der Leuchtdichte weitaus schwieriger. Ein Grund hierfür ist die Problematik, mit dem festgelegten Öffnungswinkel des Luminanzmeters die nicht exakt gleich großen Zeichen zu erfassen. Deshalb erfolgte eine Messung zu Vergleichszwecken aus einem Abstand von 150 cm und einem Erfassungswinkel von 1°. Der Mittelwert repräsentativer Kontrollreize betrug nach dieser Methode 47,4 cd/m², während der Mittelwert repräsentativer Testreize (zu lernende Zeichen) 47,2 cd/m² war. Man kann also festhalten, dass durchaus vergleichbare Leuchtdichten, Abmessungen und Komplexitäten (s. S. 33 f.) bei beiden Stimulusgruppen vorlagen.

Für die Darbietung erstellte der Versuchsleiter 15 jeweils randomisierte Listen mit je 80 Zeichen. Das heißt, dass jedes Symbol pro Versuchsperson 15 mal gezeigt wurde. Bei zehn Symbolen je Kategorie bedeutet dies, dass für jede Kategorie insgesamt 150 EEG-Segmente erfasst werden konnten. Eine solche Zahl ist nötig, da evozierte Potentiale erst durch die Mittelung von mehr als ca. 50 Messungen sichtbar zu machen sind. Durch dieses Verfahren werden zufällige und nicht korrelierte Potentialschwankungen, so genannte Hintergrundpotentiale, entfernt, da deren Summe

zu bestimmten Zeitpunkten mit zunehmender Anzahl der Segmente immer stärker gegen null strebt.

Datenverarbeitung und -mittelung

Für die Berechnung der visuell evozierten Potentiale wurden die EEG-Daten zunächst, aber auch später immer wieder, manuell einer Sichtprüfung mit dem Programm Brainvision Analyzer Professional 2 der Firma Brain Products GmbH unterzogen. Hierbei wurde vor allem auf vorher unbekannte Probleme mit Elektroden geachtet.

Anschließend erfolgte mittels eines externen Programmes die weitere Verarbeitung. Zunächst kam ein digitaler Butterworth-Bandpassfilter vierter Ordnung (z.B. beschrieben in Kapadia, 2012, S.140) von 0,3 bis 30 Hz zum Einsatz. Danach wurden die Daten anhand der zusammen mit dem EEG gespeicherten Markierungen segmentiert.

In diesem Zuge wurden zwei Schritte der Artefakterkennung durchgeführt. Erstens spürte ein hauseigenes Computerprogramm mit Bezug auf die vordersten drei Kanäle Störungen durch Augenbewegungen und vor allem Blinzeln auf. Hierbei kam eine Methode zum Einsatz, welche im Physiologischen Institut der Justus-Liebig-Universität Gießen nahezu zeitgleich mit dieser Arbeit entwickelt wurde (Klein und Skrandies, 2013). Solche Artefakte machen sich vor allem in den frontalen Kanälen bemerkbar, stören aber Prinzipiell das ganze Feld. Vor allem treten sie oft mit einem zeitlichen Abstand zum Stimulus auf, sodass sie mitten im interessierenden Zeitbereich erscheinen. Ihre Entfernung trägt somit merklich zur Datenqualität bei. Daher sollten sie entweder mathematisch, z.B. durch Anwendung einer unabhängigen Komponentenanalyse (independent component analysis, ICA) oder durch simple Eliminierung der entsprechenden Abschnitte entfernt werden (Michel et al., 2009, S. 88).

Zweitens wurde zwecks Erkennung sonstiger Artefakte ein neues Verfahren von Klein und Skrandies benutzt (Klein, 2013), dessen Treffsicherheit stichprobenartig überprüft wurde. Das Verfahren sucht innerhalb der EEG-Segmente pro Kanal nach der Anzahl der Datenpunkte bis zum ersten Vorzeichenwechseln der Autokorrelation. Von den so erhaltenen Werten wird der Median gebildet und abgerundet. Man nennt dies die Zahl „D“. Dann werden die Daten aller Segmente zusammengefasst und auf eine Normalverteilung abgebildet. Für jedes Segment werden anschließend die Daten jedes auf Normalverteilung transformierten Kanals in Zeitrichtung ausgedünnt, indem nur noch jeder D-te Datenpunkt übernommen wird. Abschließend wurde für alle Kanäle und Segmente eine Überprüfung der Verteilung von Varianz und Mittelwert

durchgeführt. Als artefaktkontaminiert bezeichnet wurden Kanäle, deren Varianz im oberen 1% (außerhalb des 0,99-Konfidenzintervalls) der Verteilung lag oder deren Mittelwert im oberen oder unteren 1% (außerhalb des 0,98-Konfidenzintervalls) der Verteilung zu finden war.

Durch Artefakte kontaminierte Segmente wurden bei beiden Verfahren vollständig verworfen.

Nach Abschluss dieses Prozesses der Segmentierung und Artefaktentfernung wurden unbrauchbare Elektroden mittels linearer Interpolation mit Bezug auf die Nachbarelektroden ersetzt, da das Beibehalten schlechter Elektroden eine relevante Verfälschung der erfassten Potentialfelder zur Folge hat (Michel et al., 2009, S. 87).

Schließlich rechnete man alle Kanäle so um, dass sie fortan nicht mehr die Potentialdifferenz zur ursprünglichen, am Kopf der Versuchsperson befindlichen Elektroden maßen, sondern die Differenz zum Mittelwert aller Elektroden („average reference“). Obwohl das Augenmerk bei der Beurteilung der topographischen Verteilung der hirnelektrischen Aktivität auf den Potentialverhältnissen der einzelnen Elektroden zueinander zu jedem Zeitpunkt liegt und diese zunächst nicht von der Referenzelektrode abhängig sind (Michel et al., 2009), ist diese Rereferenzierung sinnvoll, um bei weiteren Schritten, insbesondere der GFP-Berechnung, referenzunabhängig zu sein.

Als letztes mittelten wir die verbliebenen Segmente je nach Klasse der dargebotenen Symbole, wobei allerdings je Versuchsperson die ursprünglichen Klassen 1-4 (d.h. die gelernten Kategorien A-D) als „Test“ und die Klassen 5-8 als „Kontrolle“ zusammengefasst wurden. Hierbei wurde eine Gewichtung nach der Anzahl der eingeflossenen Segmente durchgeführt.

Auswertung

Das globale Ziel der weiteren Datenverarbeitung und -auswertung war es, aus den vorhandenen elektrophysiologischen Daten Maßzahlen zur weiteren statistischen Auswertung zu gewinnen. Mit den im Folgenden erläuterten Methoden ist es möglich, für jede Komponente die Latenz, die Feldstärke und zwei topographische Koordinaten zum Zeitpunkt des entsprechenden lokalen Maximums der Global Field Power zu bestimmen.

Visuelle Inspektion

Vor der Anwendung weiterer, automatisierter Methoden wurden die Potentialkarten manuell mit dem Programm BRAIN VISION ANALYZER 2 inspiziert. Anhand dieser Betrachtungen der Daten jeder einzelnen Versuchsperson erfolgte vorab eine Orientierung, welche Komponenten, d.h. welche über gewisse Zeitabschnitte stabilen Topographien, im Allgemeinen im hier vorhandenen Kollektiv zu erwarten seien.

Global Field Power

Wie in „Grundlagen evozierter Potentiale“ auf S. 14 angesprochen, können einzelne Komponenten über die topographischen Eigenschaften der Potentialkarten zu jedem Zeitpunkt definiert werden. Ein Maximum der vorhandenen Potentialgradienten entspricht der größtmöglichen Ausprägung einer ERP-Komponente, weil deren Hauptaktivität häufig auf umschriebene Bereiche beschränkt ist.

Ein Maß, welches zu jedem Zeitpunkt eine Aussage über die Topographie einer Potentialkarte treffen kann, ist die Global Field Power (GFP). Sie entspricht der momentanen Standardabweichung der Potentiale an allen einbezogenen Elektroden und geht auf eine Arbeit von Lehmann und Skrandies (1980) zurück.

Anders gesprochen zeigt die GFP besonders hohe Werte, wenn die Differenzen der Elektroden zum Mittelwert groß sind. Dies impliziert "starke" Felder und Gradienten auf der Skalp-Oberfläche, insbesondere dann, wenn die GFP als Kurve im Verlauf dargestellt und ihre lokalen Maxima betrachtet werden (Skrandies, 2005; Michel et al., 2009, S. 41) Ein kontinuierliches Weiterbewegen der Schwerpunkte einer Verteilung des Feldes von einer Position zur anderen ist nicht die Regel. Anders gesprochen "wandern" diese nicht. Die Wechsel finden eher sprunghaft während Phasen niedriger GFP statt (Lehmann und Skrandies, 1980; Lehmann und Skrandies, 1984, S. 236).

Außerdem haben Potentialkarten bei GFP-Peaks die höchste Signal-to-Noise-Ratio (SNR; Signal-Rausch-Verhältnis) und sind um diesen Zeitpunkt herum meist stabil. (Michel et al., 2009).

$$GFP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}$$

Formel 1 - u_i sei die Spannung der Karte u an der Elektrode i ; \bar{u} sei die Mittlere Spannung aller Elektroden der Karte u und N sei die Zahl der Elektroden innerhalb der Karte (aus Michel et al., 2009).

Ausgewertet wurden Amplitude und Latenz lokaler Maxima innerhalb bestimmter, definierter Zeitfenster. Diese Zeitfenster wurden so gewählt, dass möglichst alle Datensätze aller Versuchspersonen auch tatsächlich in ihren Grenzen einen solchen Gipfel aufweisen. Wie in Lehmann und Skrandies (1984) beschrieben, können über die so gefundenen Maxima Komponenten definiert werden. Weitere Erläuterungen finden sich unter „Grundlagen evozierter Potentiale“ auf Seite 14.

Centroide

Centroide sind definiert als negativer oder positiver Ladungsschwerpunkt einer elektrischen Feldkarte bei deren Referenzierung gegen den Mittelwert. Sie sind daher unabhängig von der Referenzelektrode (Skrandies, 2005). Dies ist abzugrenzen gegen die Feststellung von Extremwerten an einzelnen Elektroden, bei der die Räume dazwischen unberücksichtigt bleiben. Ferner wird der Begriff des Centroiden vom eigentlichen "globalen" Ladungsschwerpunkt („electric gravity centre“), der positive sowie negative Bezirke berücksichtigt, abgegrenzt (Michel et al., 2009, S. 40). Bestimmt man die Koordinaten für negativen und positiven Ladungsschwerpunkt zum Zeitpunkt eines GFP-Maximums, so erhält man zusätzliche, statistisch auswertbare Maßzahlen bezüglich der betroffenen Komponente. Das Koordinatensystem (siehe Abbildung 8 auf S. 46) ist zweidimensional und geht von einer Projektion der Elektroden auf eine flache Ebene aus. Im Fall dieser Arbeit verläuft die X-Achse von links nach rechts. Negative Werte liegen links vom Nullpunkt, positive rechts. Die Y-Achse verläuft von posterior nach anterior, wobei der Nullpunkt auf dem Inion, d.h. einer prominenten Stelle am Hinterhaupt, liegt. Positive Werte befinden sich von dieser Stelle aus in Richtung frontal.

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pos}} u_i x_i}{\sum_{i=1}^{N_{pos}} u_i}$$

Formel 2: Centroid für positiven Ladungsschwerpunkt: U_i ist die Spannung der Karte u an der positiven Elektrode i , x_i ist die Koordinate der Elektrode i auf der x-Achse, N_{pos} ist die Anzahl aller positiven Elektroden. Analog wird für den negativen Schwerpunkt und die y-Achse verfahren. (aus Michel et al., 2009)

Ergebnisse

Verhaltensebene

Lernen

Trotz der vermeintlich geringen Zeit von 20 Minuten, um alle 40 Kanji-Symbole zu lernen, konnte jede der Versuchspersonen im Mittel 35,76 (SD=5,96) Symbole richtig bezeichnen. 48 aus 81 Versuchspersonen (59,3 %) des Gesamtkollektivs wussten sogar 38 oder mehr der Zeichen. Ein deutlicher Lernerfolg war damit vorhanden.

Einfluss der Versuchsbedingung

Für die Frage, ob die Teilnehmer in unterschiedlichen Kategorien besser lernen, wurde eine Varianzanalyse herangezogen. Sie konnte jedoch für den Faktor „Bedingung“ keinen signifikanten Effekt auf die Lernleistung, gemessen an der Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson, aufzeigen (Gesamtkollektiv $n=81$; $F(2,78)=1,01$; $p<0,3705$).

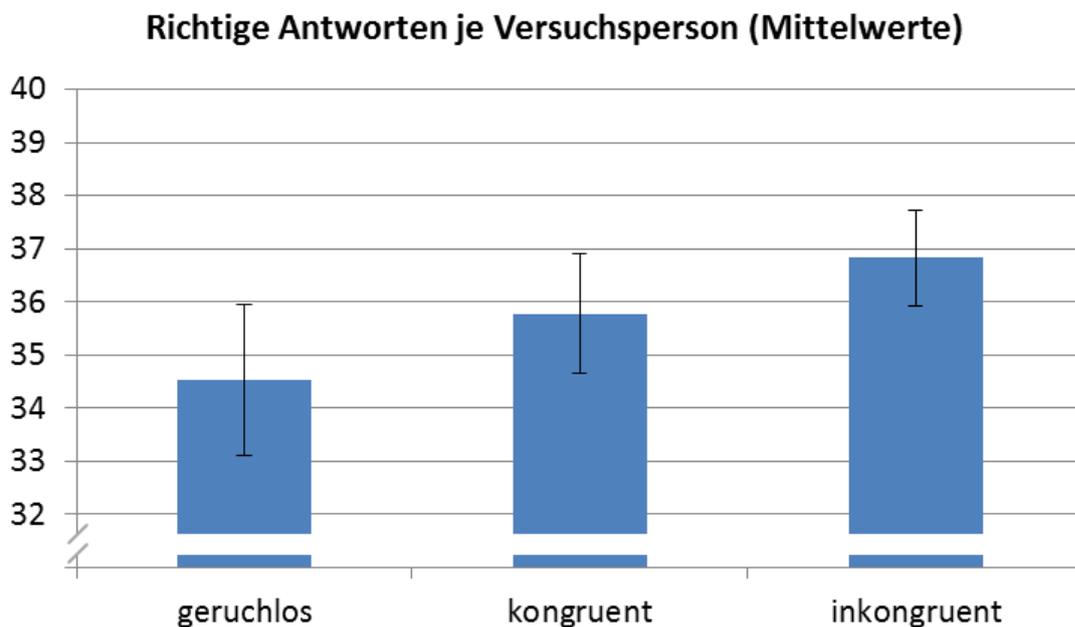


Abbildung 9 – Mittlere Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson für jede Versuchsbedingung. Der Fehlerbalken umfasst zwei Standardfehler. Gesamtkollektiv $n=81$. In keinem der Kollektive ergibt sich ein signifikanter Unterschied.

Die aus Interesse dennoch durchgeführten t-Tests erbrachten hierzu ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse (alle $p>0,05$). Einzig im Hauptversuch ($n=50$) zeigte sich andeutungsweise, dass eine Tendenz vorliegt, die Leistung in der inkongruenten Bedingung könnte sogar besser sein als in der Bedingung ohne Geruch ($p=0,12$), was

aber wegen der fehlenden Statistischen Aussagekraft nicht zu verwerten ist. Eine detaillierte Tabelle ist im Anhang unter „Verhalten“ auf S. 114 zu finden. Die Mittelwerte sind „geruchlos“: 34,52 (SD=7,11; n=25), „kongruent“ 35,78 (SD=5,86; n=27), „inkongruent“ 36,83 (SD=4,86; n=29) und in Abbildung 9 dargestellt.

Einflüsse anderer Faktoren

Zur Klärung anderer, möglicher Einflüsse wurden die Faktoren „Allgemeine Laune“, „Evaluation des Geruches in Phase 1“ (vor und während des Lernens), „Evaluation des Geruches in Phase 2“ (nach dem Lernen und während des Tests) und „Anzahl richtiger Antworten“ auf eine mögliche Korrelation untereinander für jedes der drei Kollektive separat überprüft. Die einzige statistisch signifikante Korrelation konnte zwischen der Bewertung des ersten und des zweiten Geruches im ERP-Experiment (n=50) nachgewiesen werden, die allerdings nicht verwertbar ist. Dies begründet sich dadurch, dass für die Korrelationsanalyse alle drei Geruchsbedingungen zusammengefasst beurteilt wurden und somit die Mehrzahl der erfassten Versuchspersonen den gleichen Geruch zweimal bewertet hatten.

Es gibt also keine relevante Korrelation zwischen den Variablen „Allgemeine Laune“, „Evaluation des Geruches in der Lernphase“, „Evaluation des Geruches in der Testphase“ und „Anzahl richtiger Antworten“.

Subjektive Evaluation der Gerüche

Um die affektive Beurteilung der drei unterschiedlichen Gerüche (Raumluft, Zitrone und Fichte) zu analysieren, muss man die jeweiligen Bewertungen des Umgebungsgeruches in der Phase „nachher“ vergleichen. Dies ist nur im Verhaltenskollektiv des ERP-Versuches (n=50) sinnvoll durchzuführen, weil hier die drei unterschiedlichen Teilnehmergruppen konsequent aufgefordert waren, eine Antwort abzugeben (siehe S. 44). Im Vorversuch gab es hierfür zu viele Probanden ohne Antwort.

In einer Varianzanalyse (analysis of variance, ANOVA) zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Geruchsbedingung auf die Bewertung des Umgebungsgeruches im zweiten Versuchsabschnitt ($F(2,47)=6,99$; $p<0,0022$). Dies ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zwischen den benutzten Umgebungsgerüchen ein Unterschied in der Beurteilung durch die Versuchspersonen besteht. Der reine Laborgeruch in Gruppe „geruchlos“ wurde auf einer Skala von 1 (sehr unangenehm) bis 10 (sehr angenehm) mit 5,34 von 10 (10 = sehr angenehm) bewertet (SD=0,72). Dies unterschied sich auch im t-Test hoch signifikant ($p=0,00014$) von der Bewertung des Zitronengeruches der

Gruppe „kongruent“, welcher mit 7,65 (SD=1,93) bewertet wurde. Ebenfalls angenehmer als den Laborgeruch empfand die Gruppe „inkongruent“ ihren Fichtengeruch (6,61; SD=2,12; $p=0,034$). Streng genommen erreicht dieser Wert nach der Sidak-Methode für multiple unabhängige t-Tests (Bender, Lange und Ziegler, 2007) nicht das erforderliche Niveau von $p<0,017$. Dies bedeutet, dass im engeren Sinne keine Signifikanz für einen Unterschied zwischen dem Labor- und dem Fichtengeruch vorliegt.

Wird Zitrone mit Fichte verglichen (kongruent nachher vs. inkongruent nachher), so wird dieser Unterschied nicht signifikant ($p=0,14$). Auch der Vergleich der beiden Dürfte durch dieselben Versuchspersonen („inkongruent“ vorher gegen nachher) bleibt ohne aussagekräftige Differenz (Zitrone: 7,22; SD=1,87 vs. Fichte: 6,61; SD=2,12; gepaarter t-Test $p=0,15$).

Die Teilnehmer empfanden also den Zitronengeruch gegenüber der Raumluft deutlich und Fichte tendenziell als angenehmer. Zwischen den beiden besteht hinsichtlich der affektiven Beurteilung im direkten Vergleich kein signifikanter Unterschied. Sie sind also etwa gleich „angenehm“.

Sind bestimmte Symbole besser zu lernen, als andere?

Um Herauszufinden, ob eine Kategorie der Kanji-Symbole besser oder schlechter zu lernen war als andere, werteten wir die Antworten der Versuchspersonen im Bezug auf die Kategorien aus. Hierbei wurden die richtigen Antworten aller einbezogenen Versuchspersonen für jedes Symbol einzeln aufsummiert, sodass deutlich wurde, welcher Anteil bzw. wie viele Teilnehmer das entsprechende Zeichen korrekt benennen konnten.

Eine Varianzanalyse (ANOVA) ergab für den Faktor „Stimulus-Kategorie“ (siehe S. 33) mit den Stufen A, B, C und D im Verhaltenskollektiv des Hauptversuches ($n=50$) knapp keinen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable „richtige Antworten je Kategorie“ ($p=0,056$). Ähnlich ist es im Vorversuch ($p=0,089$). Fasst man allerdings beide Stichproben zum Gesamtkollektiv ($n=81$) zusammen, so wird das Ergebnis signifikant ($p=0,032$).

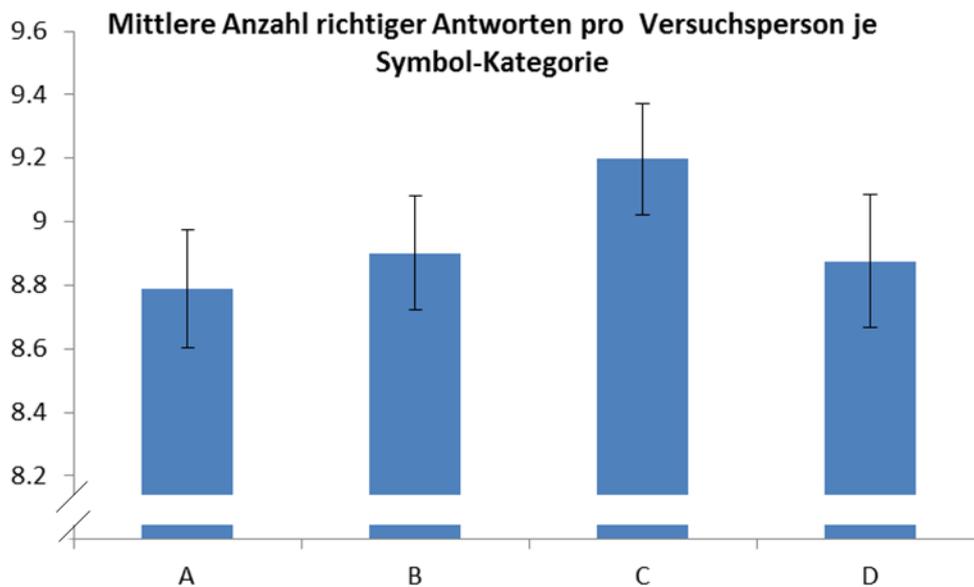


Abbildung 10 – Diagramm mit den Mittelwerten richtiger Antworten aller Versuchspersonen aus dem Gesamtkollektiv ($n=81$) in den Kanji-Kategorien Zahl (A), Eigenschaft (B), Leben (C) und Natur (D) (Maximum 10). Die schwarzen Fehlerbalken umfassen zwei Standardfehler. Das Signifikanzniveau in der Varianzanalyse ist $p=0,032$.

Bei der Durchführung von t-Tests wird deutlich, dass diese Wechselwirkung auf die tendenziell bessere Leistung in der Kategorie C (im Mittel 9,2 richtige Antworten / Versuchsperson) zurückzuführen ist. Dieser Unterschied wird auf einem Niveau von $p<0,05$ immer, auf einem Bonferroni-korrigierten multiplen Signifikanzniveau von $p<0,0084$ (6 Testungen) nur gegenüber der Kategorie A statistisch aussagekräftig (Bender, Lange und Ziegler, 2007).

Die Kategorie C („Leben“, d.h. z.B. „Mutter, Hand, Auge, Reis“ etc.) wird offenbar besser von den Versuchspersonen gelernt, als die anderen Kategorien. Dies sind Zahl (A, z.B. „fünf“), Eigenschaft (B, z.B. „wenig“) und Natur (D, z.B. „Felsen“).

Elektrophysiologie

Potentialkarten und Beschreibung

Bei der Betrachtung der Potentialkarten aller einzelnen Versuchspersonen fallen Einzelheiten auf, die bei einer reinen Sichtung der gemittelten Daten innerhalb einzelner Kategorien (sog. „grand average“) oft weniger oder gar nicht zu sehen sind. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass allein durch die Streuung der Latenzen einzelner Komponenten bei der Mittelung über viele Teilnehmer diese nicht mehr als einzelne Aspekte abgrenzbar sind.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Potentialkarten einer ausgewählten Versuchsperson, während Abbildung 11 die Amplitude der Global Field Power im Zeitverlauf für diesen Datensatz darstellt. Wegen der diversen unterschiedlichen Bezeichnungen in der Literatur, die durchaus zu Definitionsproblemen führen können, verwendet der Autor hier Abkürzungen mit mittlerer oder zumindest ungefährender Latenz und ggf. Polarität der Komponente. Beispielsweise wäre eine occipitale Positivität um 100 ms das „P100“. Gibt er keine Polarität an, sondern nur die mittlere Latenz, so wird der Buchstabe C verwendet, z.B. „C117“.

Von circa 50 bis 90 ms ist eine occipitale Negativität mit einem ungefähren Maximum bei 75 ms zu beobachten. Hierauf folgt, schnell und unmittelbar, eine weitere Komponente, die occipital einen positiven Schwerpunkt zeigt und deren größte Ausprägung meist bei 110 ms erreicht ist. Bei einigen, aber nicht allen, Teilnehmern schließt sich eine kürzere Phase an, in der diese – am ehesten dem P100 entsprechende Komponente – scheinbar etwas nach parietal wandert. In Einzelfällen wird der Eindruck erweckt, es könnte sich um eine zweite Komponente handeln, welche das abklingende P100 überlappt. Dies ist in Abbildung 12 bei 130 und 140 ms annähernd zu erkennen, wobei dort schon linksseitig eine negative Folgeaktivität apparent wird. Zwischen 150 und 190 ms bildet sich in der Regel eine Konstellation aus, die occipital eine Negativität und parietocentral oft eine deutliche Positivität zeigt. In Abbildung 12 nicht zu erkennen ist, dass diese gelegentlich und in Einzelfällen von einer parieto-occipital positiven Aktivität gefolgt wird, die schon bei etwa 220 ms Eintritt. Um 270 ms findet sich dann eine in der Regel bilateral occipital ausgeprägte Positivität (P270), die sich leicht nach parietal und in Richtung der Mittellinie verschiebt. Es sei angemerkt, dass dieser Übergang innerhalb weniger Millisekunden von statten geht und der Begriff „wandern“ hier lediglich auf eine scheinbare Verschiebung des Schwerpunktes hinweisen soll. Der Unterschied ist auch nicht bei allen Versuchspersonen sicher abzugrenzen, weshalb meist die letztere der beiden Komponenten dominiert. Dieses „P300“ wirkt bei einigen Versuchspersonen eher rechtsbetont und wird ab ca. 360 ms von einer länger andauernden occipitalen Positivität abgelöst. Diese ist meist nicht so deutlich großflächig wie in Abbildung 12 und ebbt jenseits von 440 ms in der Regel ab (P400). Hieran schließt sich eine längere Periode an, die von wiederkehrenden occipital oder parieto-occipital negativen Komponenten geprägt ist und bis zum Ende der Beobachtungszeit (950 ms) ausgedehnt werden kann. Die genaue Anzahl dieser Komponenten variiert jedoch von Versuchsperson zu Versuchsperson. Meist liegen diese bei etwa 550 ms, 620-650 ms, 700-720 ms, 790 ms und 900 ms. Die beiden letztgenannten (N790 und N900) weisen

allerdings im Vergleich zu den anderen eine deutlich diffusere Aktivität auf, weshalb die Komponenten N550, N620 und N700 im Kontrast hierzu den Anschein erwecken, eine Wiederholung ähnlicher Aktivität zu sein. Hiervon ist die N700 die am zuverlässigsten zu findende Komponente und liegt bei allen Versuchspersonen in unterschiedlicher Ausprägung vor.

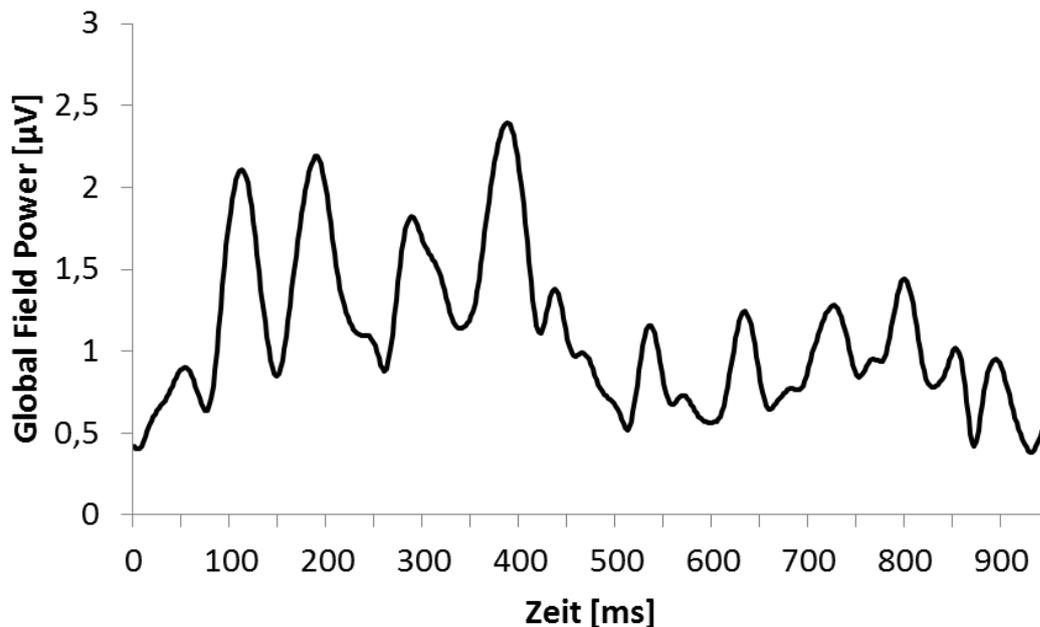
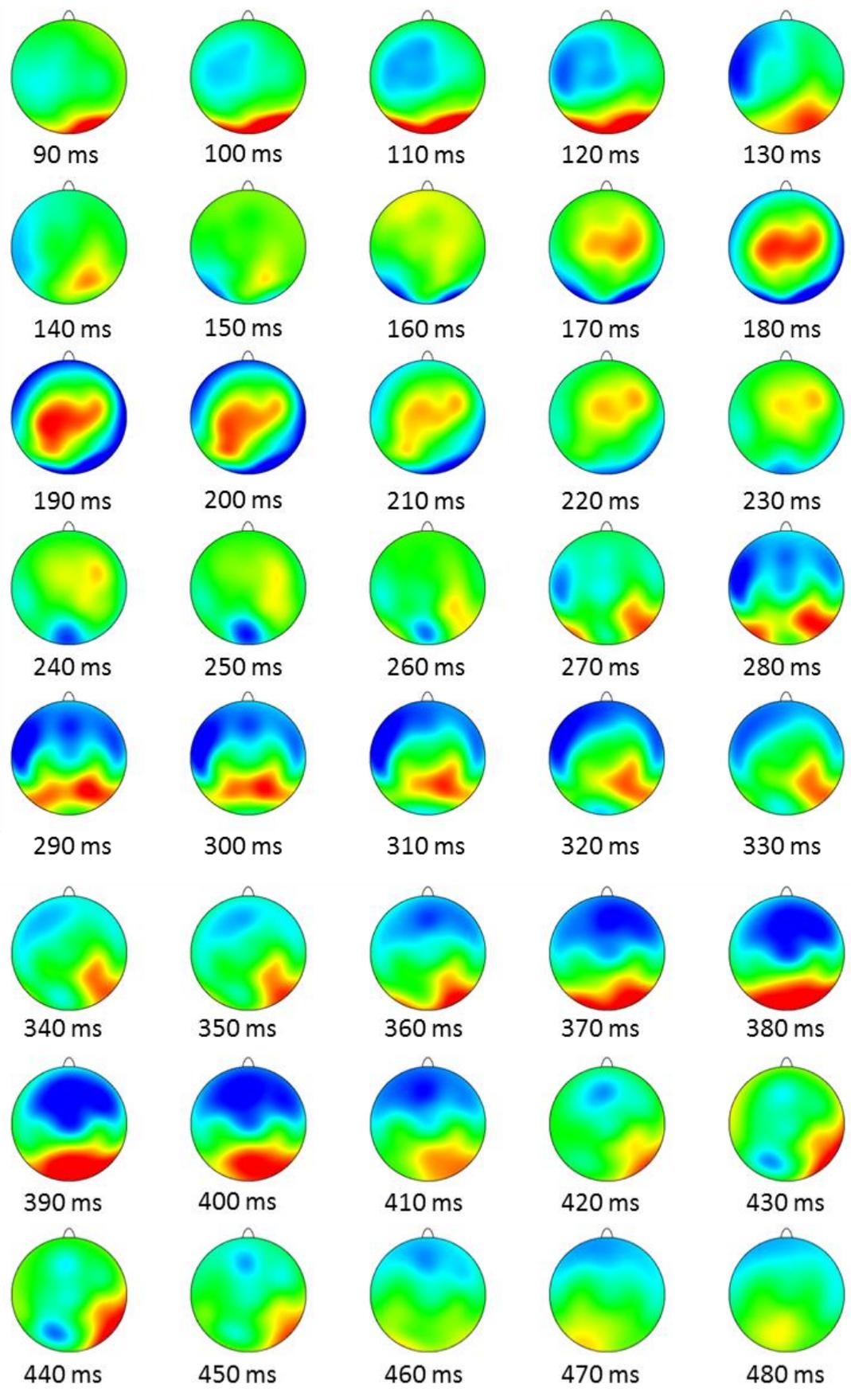


Abbildung 11 – Global Field Power im Zeitverlauf bei Versuchsperson VP-E-35, vorher, Testreize (d.h. passend zu Abbildung 12). Gipfel entsprechen besonders steilen Gradienten und stabilen topographischen Verteilungen, während Senken mit instabilen Zuständen stark veränderlicher Potentialverteilungen einhergehen (Lehmann und Skrandies, 1980).



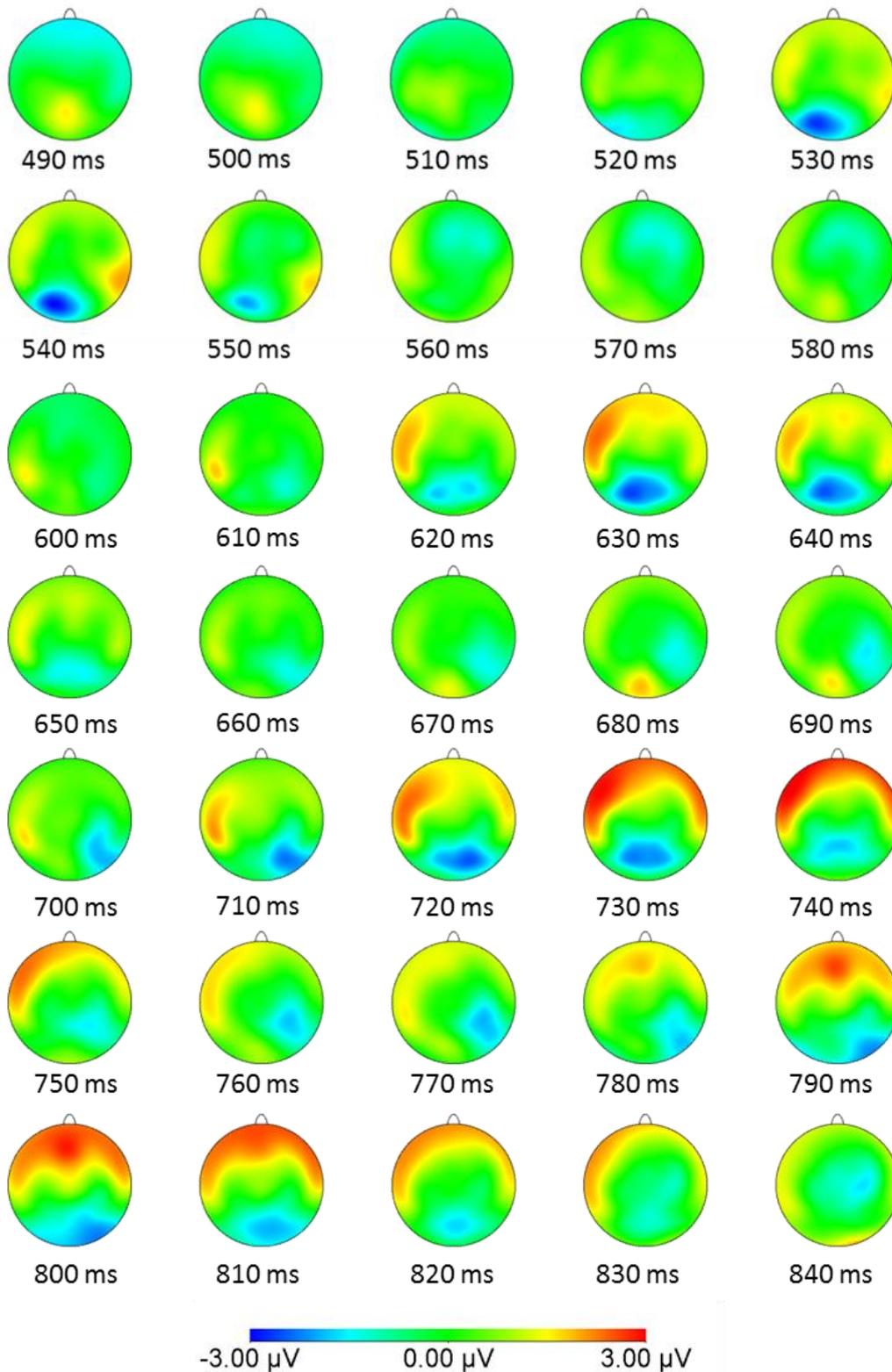


Abbildung 12 – Potentialkarten einer ausgewählten, beispielhaften Versuchsperson (VPE35, vorher, Testreize, kubische Spline-Interpolation, all-in-one-maps mit 120° erfasstem Winkel) von 90 bis 840 ms. Man erkennt deutlich die unterschiedlichen topographischen Konfigurationen. Siehe Text auf S. 55

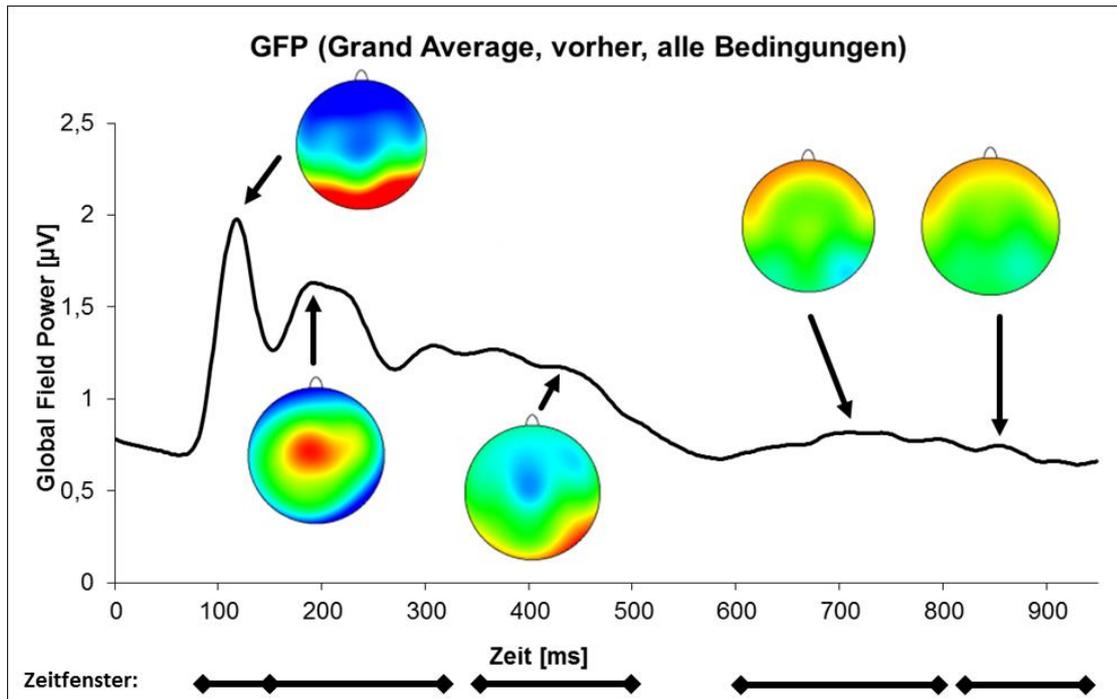


Abbildung 13 – Beispielhafte Darstellung der Global Field Power im Zeitverlauf mit ausgewählten Potentialkarten, durch Pfeile bestimmten Zeitpunkten zugeordnet; gemittelte Daten (grand average) aller erfassten Versuchspersonen VORHER (vor dem Lernen) über alle Bedingungen, Kontroll- und Testreize. Ungewichtet. Kubische Spline-Interpolation, Skala von -2 (blau) bis +2 μV (rot). Am unteren Rand sind die Zeitfenster dargestellt. Das erste reicht von 90 bis 149 ms mit einer mittleren Latenz über alle Versuchspersonen und Bedingungen von 117 ms, das zweite von 150 bis 308 ms (mittlere Latenz: 215 ms), das dritte von 340 bis 499 ms (mittlere Latenz: 407 ms), das vierte von 600 bis 788 ms (mittlere Latenz: 704 ms) und das fünfte von 810 bis 929 ms (mittlere Latenz: 865 ms).

Definition der Komponenten evozierter Hirnaktivität mittels GFP

Ausgehend von der Betrachtung der Potentialkarten verschiedener einzelner Versuchspersonen sowie zusammengefasster Daten wurden Zeitfenster definiert, innerhalb derer für jede Versuchsperson in jede Versuchsbedingung und Messung ein lokales Maximum in der GFP-Kurve zu finden war. Hierbei kam zum Tragen, dass zwar jede Versuchsperson zu ähnlichen, aber nicht genau gleichen Zeitpunkten vergleichbare Aktivität und ein entsprechendes GFP-Maximum aufwies, wie in „Potentialkarten und Beschreibung“ angegeben. Es war für das Verfahren daher nötig, die Zeitfenster für die GFP-Kurvenanalyse so zu strecken, dass sie gegebenenfalls nicht nur eine, sondern mehrere der weiter oben beschriebenen Komponenten erfassten.

Mit dieser Methode fanden sich fünf Zeitfenster. Abbildung 13 zeigt beispielhaft, wie diese mit dem Verlauf der gemittelten GFP in Beziehung stehen. Das erste Zeitfenster reicht von 90 bis 149 ms mit einer mittleren Latenz über alle Versuchspersonen und

Bedingungen von 117 ms, das zweite von 150 bis 308 ms (mittlere Latenz: 215 ms), die dritte von 340 bis 498 ms (mittlere Latenz: 407 ms), die vierte von 600 bis 788 ms (mittlere Latenz: 704 ms) und die fünfte von 810 bis 930 ms (mittlere Latenz: 865 ms). In den folgenden Abschnitten werden die Komponenten anhand ihrer mittleren Latenz über alle Versuchspersonen abgekürzt werden, z.B. C117.

Analyse der Komponenten

Insgesamt werden im Folgenden sechs Parameter zur weiteren statistischen Auswertung verwendet. Wie weiter oben und unter „Global Field Power“ auf Seite 50 beschrieben, wurde die GFP benutzt, um die Komponenten evozierter Hirnaktivität anhand der Kurvenmaxima der GFP im Zeitverlauf zu definieren (siehe auch Abbildung 13). Hierüber ergeben sich für den Zeitpunkt dieser Maxima jeweils eine Latenz nach Reizdarbietung in [ms] und eine Amplitude in [μ V]. Außerdem können für diesen Zeitpunkt die Position des positiven und des negativen Centroiden errechnet werden. Hierfür werden x-Achse (links-rechts) und y-Achse (posterior-anterior) als separate Werte angegeben.

Vergleich mit der P100-Komponente durch Schachbrett-Kontrastumkehr-Reize

Der Mittelwert der Latenz des jeweils größten GFP-Maximums in einem Zeitfenster von 90 bis 149 ms lag bei der Darbietung von Schachbrettmuster-Reizen in beiden Gesichtsfeldhälften über alle Versuchspersonen (n=41) bei 107,07 ms (SD=9,14 ms). Zum Vergleich hierzu lagen die Kanji-Reize zum ersten Messzeitpunkt, d.h. die japanischen Symbole vor dem Lernen (Test und Kontrolle), bei 117,05 ms (SD=8,78 ms). Der Unterschied ist signifikant ($p < 10^{-6}$ im gepaarten t-Test). Die GFP-Amplitude der durch Schachbrettreize evozierten Aktivität betrug 3,24 μ V (SD=1,13 μ V), die der Kanji-Reize 2,1 μ V (SD=0,79 μ V; $p < 10^{-6}$). Der Mittelwert der Position des positiven Centroiden auf der X-Achse war 1,55 % (SD=6,08%) für Schachbrett-Reize und 6,23 % (SD=6,77 %) für Kanji-Reize ($p < 0,001$). Auf der y-Achse lag er für Schachbrett-Muster mehr posterior (18,74 %; SD=6,71 %) als für Kanji-Zeichen (22,4 %; SD=5,86 %; $p < 10^{-6}$). Diese Verhältnisse werden in Abbildung 14 auf Seite 62 in Abbildung 15 auf Seite 63 dargestellt.

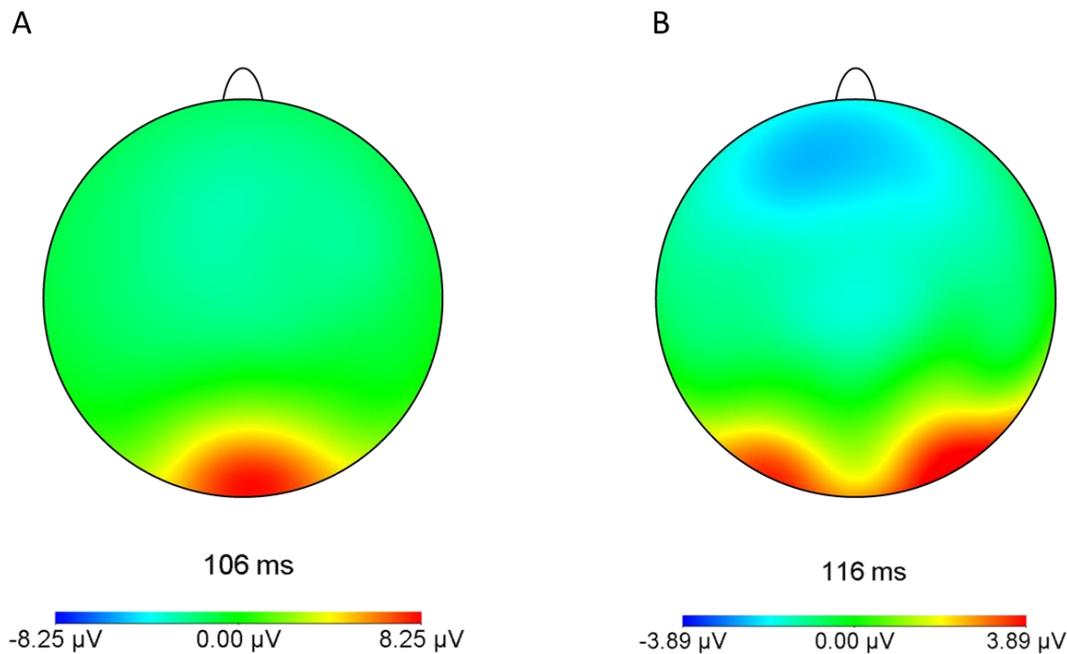


Abbildung 14 – Potentialkarten der zusammengefassten Daten aller eingeschlossenen Versuchspersonen (sog. Grand Average; nicht gewichtet oder normalisiert) zum Zeitpunkt des höchsten lokalen Maximums der Global Field Power im Zeitfenster zwischen 90 und 149 ms nach der Reizdarbietung. Die linke Abbildung (A) zeigt die durch Schachbrettmuster hervorgerufene Konstellation bei 106 ms. Hier ist die große Amplitude der occipital positiven Komponente („P100“) zu beachten. Die Karte rechts (B) entstand bei 116 ms nach der Darbietung noch nicht memorisierter Kanji-Zeichen (d.h. Test- und Kontrollreize vor dem Lernen). Auffällig ist die lateralisierte Ausprägung der positiven Komponente nach eher occipito-temporal.

Ein Vergleich mit Kanji-Reizen, die gelernt wurden (d.h. „Testreize, nachher“), erbringt eine ähnliche Konstellation, die jedoch für die Position des positiven Centroiden mit nicht ganz so deutlicher Signifikanz. Die Latenz liegt bei 118,49 ms (SD=10,44 ms; $p < 10^{-6}$), die GFP bei 2,07 μV (SD=0,78 μV ; $p < 10^{-6}$), die x-Achsen-Position bei 4,79 % (SD=6,77 %; $p = 0,032$) und die y-Achsen-Position bei 21,69 % (SD=5,32 %; $p = 0,028$). Die Betrachtung des Unterschiedes zwischen gelernten und ungelernten Kanji erfolgt in späteren Abschnitten dieser Arbeit.

Hinsichtlich der Position des negativen Centroiden dieser frühen Komponente unterschieden sich Schachbrettmuster und Kanji nicht ($p > 0,05$).

Zusammenfassend gesprochen besitzt die P100-artige Aktivität der vor dem Lernen dargebotenen bedeutungslosen Kanji im Gegensatz zum klassischen P100 eine um etwa 10 ms höhere Latenz, eine um 1,14 μV geringere Global Field Power und eine andere Topographie des positiven Ladungsschwerpunktes. Dieser liegt absolut 4,68 % weiter rechts und 3,66 % weiter anterior.

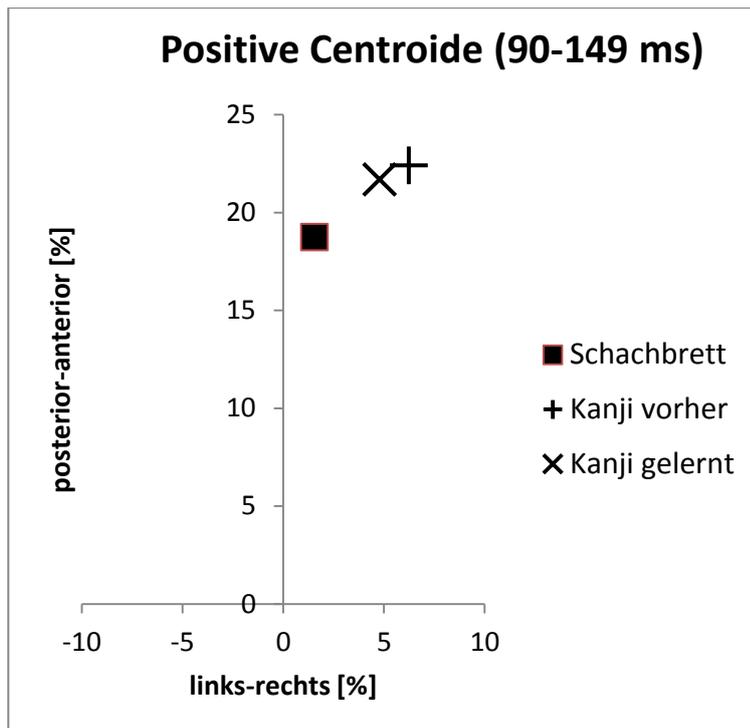


Abbildung 15 – Position der positiven Centroide zum Zeitpunkt des höchsten GFP-Gipfels im Zeitfenster zwischen 90 und 149 ms nach der jeweiligen Reizdarbietung. Verglichen werden Schachbrettmuster-Umkehrungen mit den Darbietungen der Kanji-Symbole, bevor sie gelernt wurden („vorher“, Kontrolle und Test) und nachdem sie gelernt wurden („gelernt“, entspricht „Testreize nachher“). Abszisse und Ordinate haben ihren Nullpunkt auf dem Inion. Die Angabe erfolgt in % des Abstandes Inion-Nasion. Positive Werte auf der x-Achse bedeuten eine rechtsseitige Lage, positive Werte auf der y-Achse bedeuten eine Lage anterior zum Inion.

Zeitfenster 90-149 ms (C 117)

Zunächst wurden für jedes Zeitfenster Varianzanalysen (ANOVA) durchgeführt. Im ersten Zeitfenster mit einer globalen mittleren Latenz von 117 ms hatte der Faktor „Stimulustyp“, d.h. ob Test oder Kontrolle, einen Einfluss auf die Latenz ($F(1,38)=11,86$; $p<0,0014$). Testreize lagen bei 118,48 ms und Kontrollreize im Mittel bei 115,48 ms. Hinsichtlich des Faktors „Geruchsbedingung“ zeigte sich eine Interaktion mit dem Faktor „Zeitpunkt“ (vorher oder nachher) ($F(2,38)=4,11$; $p<0,0241$) was in Abbildung 16 dargestellt ist. Eine Interaktion mit Stimulustyp x Bedingung x Zeitpunkt wurde nicht signifikant. Zur weiteren Evaluation angeschlossene t-Tests zwischen vorher und nachher, sowie zwischen Kontrolle und Test, bestätigten bezüglich der Latenz den Unterschied. Bei Testreizen (gelernte Kanji) in der Bedingung „geruchlos“ (Raumluft) lag das Maximum der Komponente nach dem Lernen im Mittel später als „vorher“ (vorher: 117,83 ms; nachher: 123,33 ms; gepaarter t-Test $p<0,02$). Auch der Unterschied in der Latenz zwischen Test- und Kontrollreizen, der vorher nicht

signifikant war, wurde nach dem Lernen aussagekräftig ($p=0,015$). Andere Werte hinsichtlich der Testreize wurden nicht signifikant.

Die GFP wurde ebenfalls durch den „Stimulustyp“ beeinflusst ($F(1,38)=11,47$; $p<0,0017$), welcher mit der Geruchsbedingung interagiert („Geruchsbedingung“ x „Stimulustyp“; $F(2,38)=6,16$; $p<0,0048$). Ferner fand sich eine signifikante Wechselwirkung zwischen „Stimulustyp x Geruchsbedingung x Zeitpunkt“ mit $F(2,38)=7,41$ und $p<0,0019$ (siehe Abbildung 17). Aus diesem Grund wurde mittels t-Tests nach der Ursache für diese Beziehung gesucht. Ein besonderes Augenmerk lag wegen des großen numerischen Unterschiedes in der Bedingung „geruchlos“ auf der Beurteilung der Unterschiede zwischen Test- und Kontrollreizen. Kontrolle und Test unterscheiden sich hier schon „vorher“ signifikant ($p=0,0011$) (sic!). In der Geruchsbedingung „kongruent“ ist weder „vorher“ noch „nachher“ ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Reiztypen zu beobachten. Für „inkongruent“ wird „nachher“ der Unterschied zwischen Kontrolle und Test signifikant (Test: $2,06 \mu\text{V}$; Kontrolle: $2,27 \mu\text{V}$; $p=0,0038$). Dieses Signifikanzniveau würde auch sehr konservativen Korrekturmethode standhalten (Bender, Lange und Ziegler, 2007).

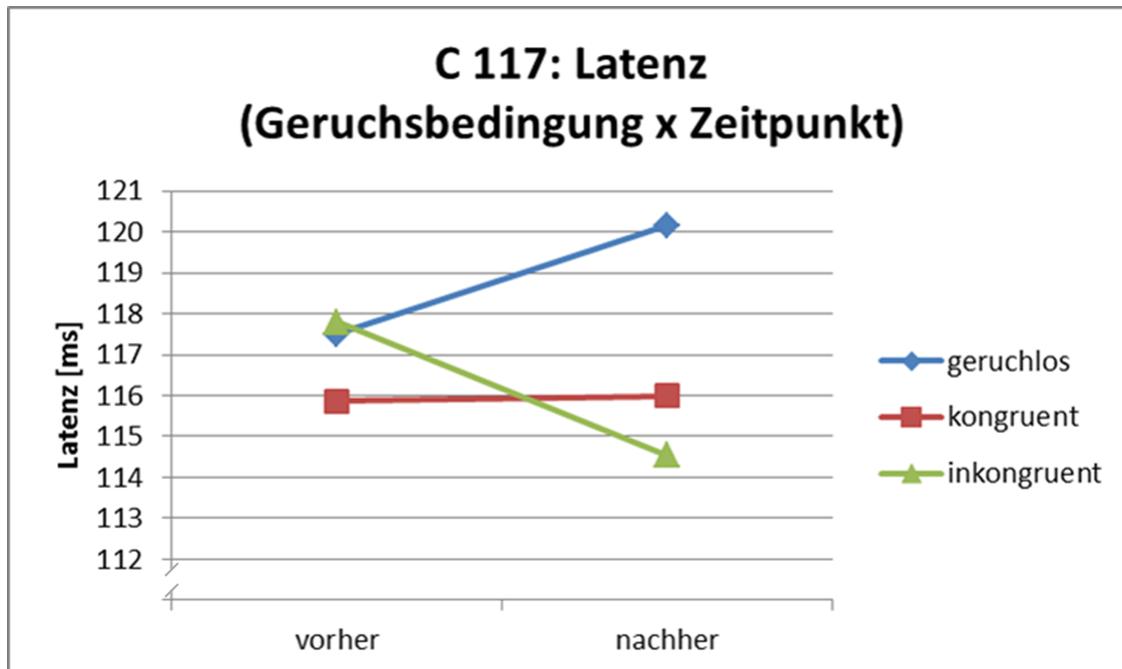
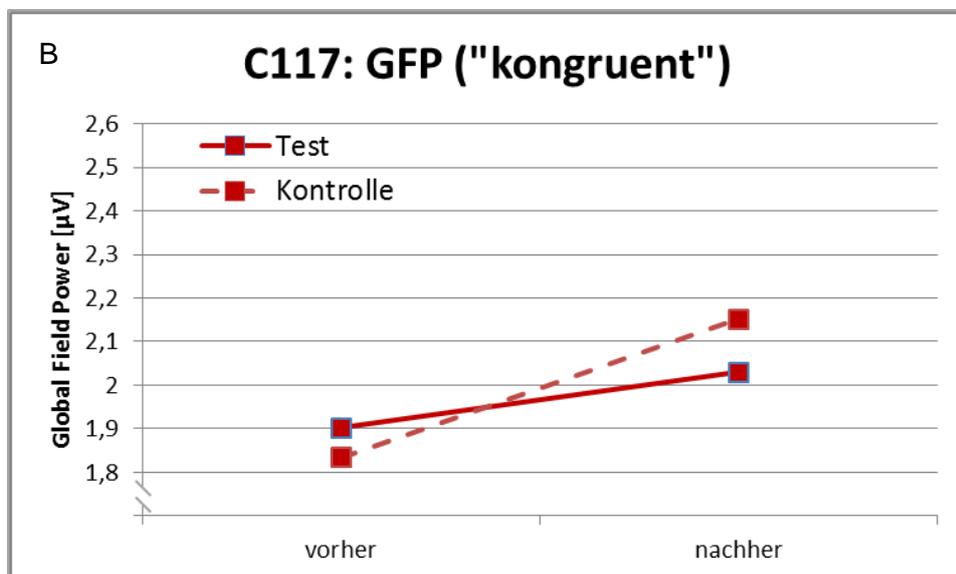
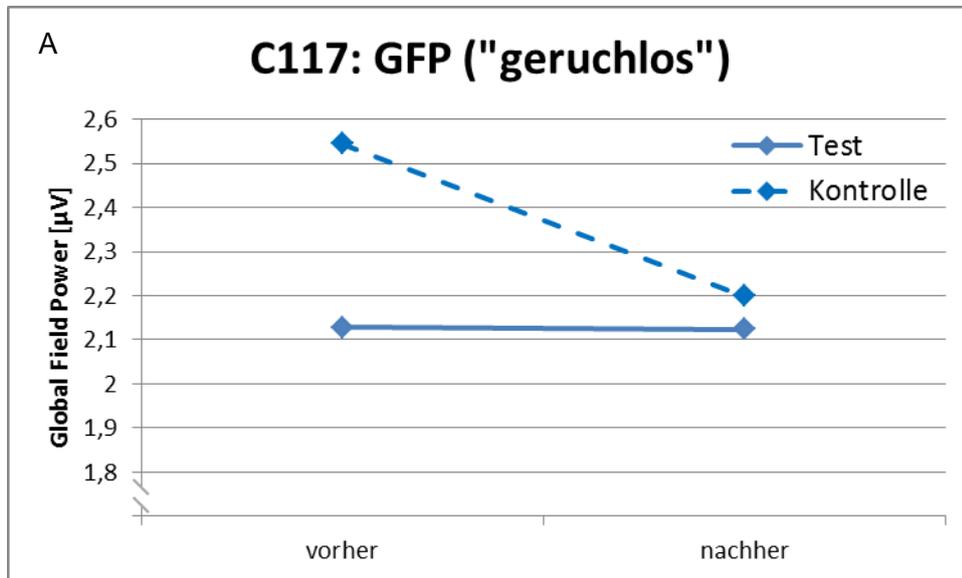


Abbildung 16 - Darstellung der Interaktion der Faktoren „Geruchsbedingung“ x „Zeitpunkt“ für die Latenz der Komponente C117 ($F(2,38)=4,11$; $p<0,0241$).

Dies heißt also erstens, dass beide Reiztypen in der Geruchsbedingung „kongruent“ im Zeitverlauf eine Vergrößerung der Global Field Power-Amplitude erfahren. Zweitens gilt

für die Geruchsbedingung „inkongruent“, dass gelernte Test-Reize im Gegensatz zu ungelerten Kontroll-Reizen eine geringere Aktivierungsstärke im Zeitverlauf zur Folge haben. Drittens zeigt „geruchlos“ einen Abfall der GFP für Kontrollreize und keinerlei Veränderung bei den Testreizen, wobei ein [unlogischer] Unterschied zwischen der GFP dieser beiden Reiztypen zum Zeitpunkt „vorher“ besteht.



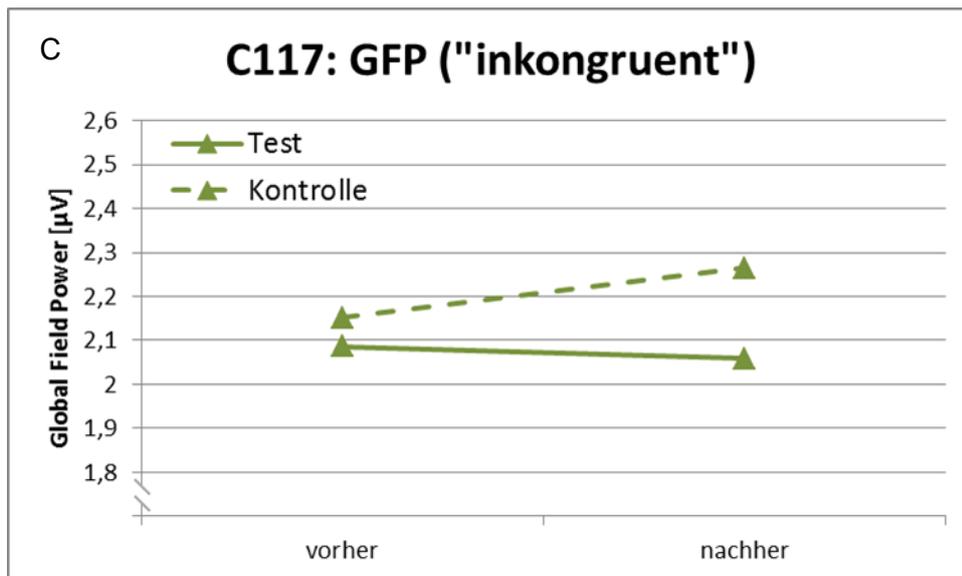


Abbildung 17 a, b und c – 3-Faktoren-Interaktion „Stimulustyp x Zeitpunkt x Geruchsbedingung“ ($F(2,38)=7,41$ und $p<0,0019$), getrennte Darstellung für die drei Geruchsbedingungen. Teil a – Global Field Power als Funktion der Zeit, durch Kontrollreize (nicht gelernte Zeichen) und Testreize (zwischen den Messungen gelernte Zeichen) hervorgerufene Komponente mit globaler mittlerer Latenz von 117 ms. Gezeigt werden die Werte der Versuchsbedingung ohne Geruch („geruchlos“) zu den Zeitpunkten vor und nach dem Lernen. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten für „Test“ und „Kontrolle“ wir zum Zeitpunkt „vorher“ bereits signifikant (t-Test; $p=0,0011$), „nachher“ nicht. Teil b – Wie Teil a, aber für „kongruent“ dargestellt. Hier ergibt sich kein signifikanter Mittelwertsunterschied zwischen Test- und Kontrollreizen im t-Test. Teil c – Wie Teil a, aber für „inkongruent“ dargestellt. Hier ist „nachher“ der Unterschied zwischen Test und Kontrolle signifikant (gepaarter t-Test; $p=0,0038$)

Bezüglich des positiven Centroiden, d.h. des positiven Ladungsschwerpunktes, ergab sich ein signifikanter Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“. Dieser fand sich sowohl auf der Posterior-Anterior-Achse; $F(1,38)=5,56$; $p<0,0236$) als auch auf der Links-Rechts-Achse; $F(1,38)=5,07$; $p<0,0302$). Weitere Interaktionen zeigten sich nicht.

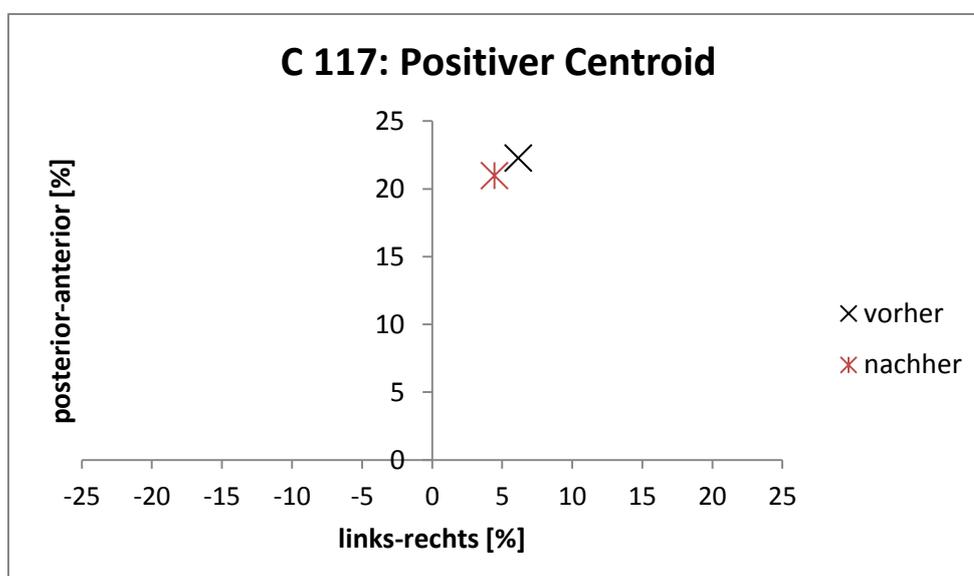


Abbildung 18 – C117, positiver Centroid, x-Achse (links-rechts) und y-Achse (posterior-anterior) im Vergleich vorher und nachher. Es herrscht ein signifikanter Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ auf die Position (y-Achse: $F(1,38)=5,56$; $p<0,0236$; x-Achse: $F(1,38)=5,07$; $p<0,0302$).

Für den negativen Centroiden konnte in der Varianzanalyse ebenfalls nur ein Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ auf die Position auf der y-Achse (posterior-anterior) gezeigt werden ($F(1,38)=9,07$; $p<0,0046$). Weder für die „Geruchsbedingung“ noch für den „Stimulustyp“ wurde die ANOVA signifikant. Ergänzend durchgeführte t-Tests offenbarten allerdings einige Tendenzen. Unter beiden Bedingungen mit Gerüchen, d.h. unter der Geruchsbedingung „kongruent“ und „inkongruent“, zeigt sich eine andeutungsweise Verlagerung nach anterior („kongruent“: 62,85% und 66,95% auf der y-Achse; $p=0,0198$; „inkongruent“: 60,2% und 65,64; $p=0,0297$). Für „geruchlos“ ist dies nicht einmal annähernd der Fall ($p=0,55$). Auf der x-Achse finden wir nur für die Bedingung „kongruent“ eine leichte Rechtswärtsbewegung des negativen Centroiden auf die Mittellinie zu (von -4,84% auf -2,27%, $p=0,035$).

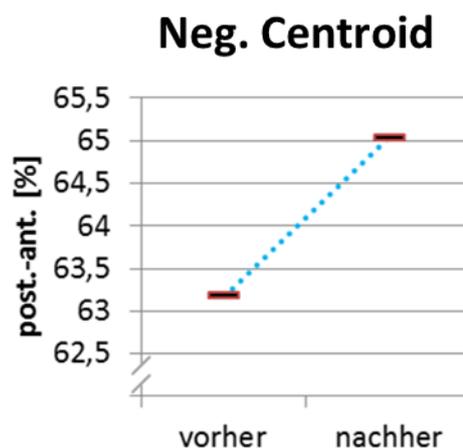


Abbildung 19 – Für den negativen Centroiden herrschen ebenfalls topographische Effekte in der Varianzanalyse ($F(1,38)=9,07$; $p<0,0046$), allerdings nur für die Anteriorität (y-Achse).

Zeitfenster 150-309 ms (C 215)

Die zweite Komponente fand sich zwischen 150 und 308 ms. Die mittlere Latenz des höchsten lokalen Maximums der Global Field Power in diesem Zeitfenster betrug global 215 ms. Der Faktor „Geruchsbedingung“ hat in der Varianzanalyse einen Einfluss auf die jeweilige Latenz ($F(2,38)=3,92$; $p<0,0284$). Die hierzu ergänzend durchgeführten gepaarten t-Tests erbrachten jedoch im Vorher-Nachher-Vergleich kein signifikantes Ergebnis.

Für die Centroide wurden nur Ergebnisse für den positiven signifikant. Er weist für seine x-Achse eine geringe Linksverlagerung bedingt durch „Zeitpunkt“ auf (vorher: 1,57%, nachher: -0,24%; $F(1,38)=6,63$; $p<0,0140$). Hinsichtlich seiner y-Achse kommt es zu einer Interaktion „Geruchsbedingung“ x „Stimulustyp“ ($F(2,38)=3,39$; $p<0,0444$)

C 215: Latenz ("Geruchsbedingung")

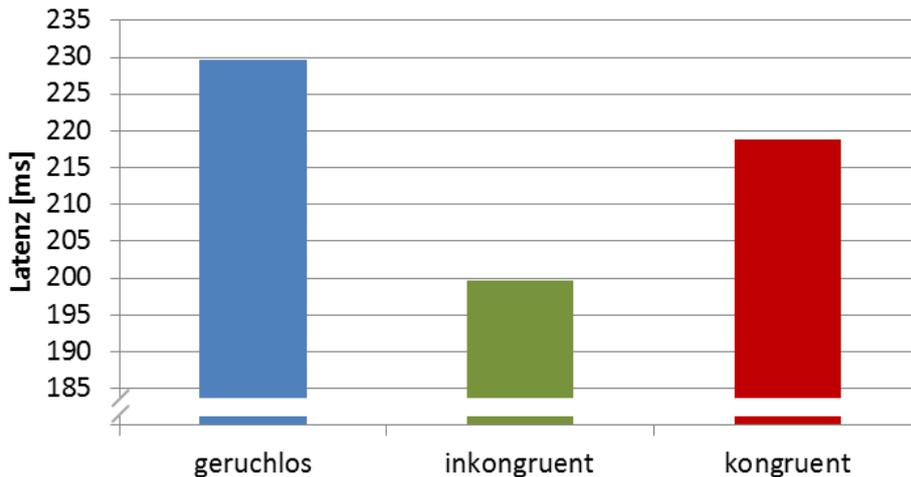


Abbildung 20 – Darstellung des Einflussfaktors „Geruchsbedingung“ auf die Latenz der Komponente C215 (150-308 ms). $F(2,38)=3,92$; $p<0,0284$. Am frühesten trat der GFP-Gipfel in der inkongruenten Geruchsbedingung auf. Die Faktoren „Zeitpunkt“ und „Stimulustyp“ hatten keinen Einfluss auf diesen Parameter.

C 215: pos. Centroid, y-Achse (Geruchsbedingung x Stimulustyp)

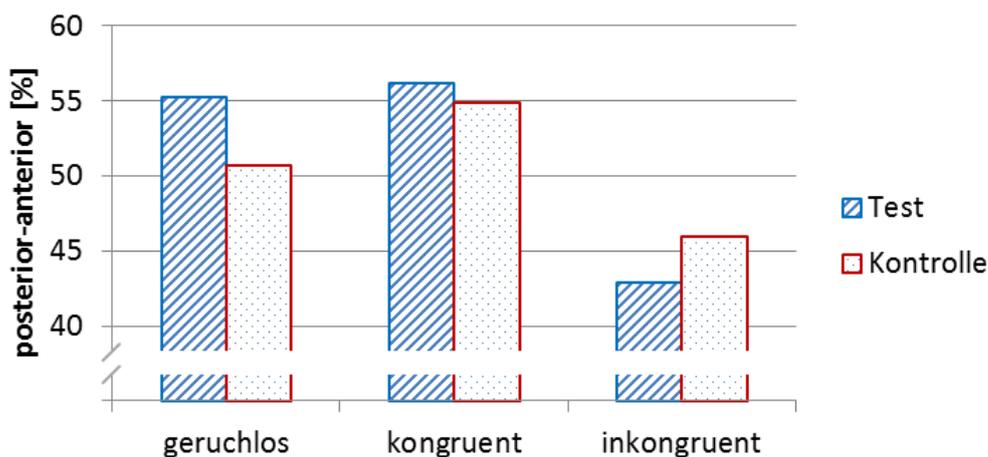


Abbildung 21 - Komponente C 215: Interaktion von Geruchsbedingung und Stimulustyp für den positiven Centroiden, y-Achse ($F(2,38)=3,39$; $p<0,0444$). In der Bedingung „inkongruent“ erscheint der positive Centroid deutlich mehr posterior als in den anderen beiden. Man beachte, dass der Faktor „Zeitpunkt“ keine Beachtung findet und somit sowohl die Phase mit Zitronen- als auch mit Fichtengeruch zusammengefasst werden.

Eine Tendenz in t-Tests (vorher vs. nachher) zeigt an, dass sich der positive Centroid der Kontrollreize unter der Bedingung „geruchlos“ um fast 5% nach links verlagert (x-Achse: 5,34% vorher, 0,51% nachher; $p=0,051$). In den anderen Bedingungen, d.h. unter Gerüchen, ist diese Bewegung zwar auch vorhanden, aber auch von der Tendenz nicht so ausgeprägt (beide $p=0,11$).

Zeitfenster 340-499 ms (C 407)

Die Varianzanalyse erbrachte für die Komponente mit einer mittleren globalen Latenz von 407 ms keine signifikanten Ergebnisse. Dies gilt für Latenz, Global Field Power, positiven und negativen Centroiden.

Bei zur Orientierung durchgeführten gepaarten t-Tests wurden allenfalls zwei Konstellationen auffällig. In der „kongruent“-Bedingung kommt es für Kontrollreize zu einem Anstieg der GFP (vorher: 1.47 μV , nachher: 1.58 μV , $p=0,036$) und in der Tendenz auch der Latenz (vorher: 390,14 ms; nachher: 411,86 ms; $p=0,051$). Siehe Abbildung 31 und Abbildung 32 im Anhang auf Seite 119 f.

Eine vage Tendenz für eine Veränderung des positiven Centroiden auf der x-Achse in der inkongruenten Bedingung zeichnete sich ab, sowohl für Test als auch für Kontrolle. Hierbei wurde der Unterschied zwischen Test und Kontrolle nach dem Lernen knapp nicht signifikant ($p=0,059$). Für negativer Centroid, Y-Achse, vorher, differierten wieder die Kontroll- und Testreize ($p=0,045$). Siehe Abbildung 33 im Anhang auf Seite 120.

Zeitfenster 600-789 (C 704)

Für das nächste Zeitfenster, das sich von 600 bis 788 ms erstreckt und dessen globale mittlere Latenz bei 704 ms liegt, offenbart die ANOVA eine Interaktion zwischen den unabhängigen Variablen „Geruchsbedingung“ und „Stimulustyp“ bei der Latenz ($F(2,38)=4,05$; $p<0,0254$), die in Abbildung 22 dargestellt ist. Der Faktor „Zeitpunkt“ spielt in der Varianzanalyse keine relevante Rolle, jedoch zeigen sich in den t-Tests nennenswerte Tendenzen. Vor dem Lernen unterscheiden sich im t-Test in der Bedingung „kongruent“ signifikant ($p=0,038$) und in der Bedingung „inkongruent“ tendenziell ($p=0,058$) die Latenzen der Kontrollreize von denen der Testreize. Für „geruchlos“ war dies nicht der Fall.

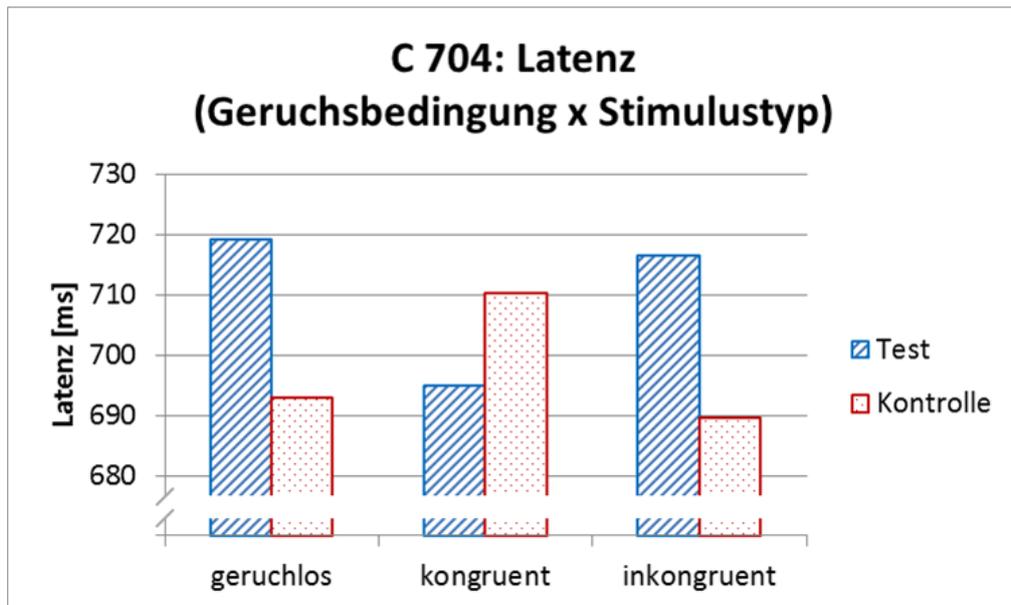


Abbildung 22 – Komponente C704: Darstellung der Interaktion "Geruchsbedingung" x "Stimulustyp" ($F(2,38)=4,05$; $p<0,0254$). Test- und Kontrollreize zeigen unabhängig vom „Zeitpunkt“ ein sehr unterschiedliches Verhalten. Auch hier bedeutet dies, dass nur zählt, dass überhaupt ein Geruch dargeboten wurde, aber nicht welcher. Andernfalls hätte der Faktor „Zeitpunkt“ einen signifikanten Einfluss haben müssen.

Der Faktor „Stimulustyp“ (Test/Kontrolle) übt auf die Global Field Power zum Zeitpunkt ihres Maximums im untersuchten Bereich einen Einfluss aus ($F(1,38)=5,42$; $p<0,0254$). Ferner besteht eine Wechselwirkung zwischen „Stimulustyp“ und „Zeitpunkt“ ($F(1,38)=4,56$; $p<0,0393$) (Abbildung 23). Die Geruchsbedingung bleibt außen vor. Mittels t-Tests untersuchte man die o.g. Wechselwirkung bezüglich der GFP. Hier zeigte sich ebenso wie für die Latenz, dass nur zum Zeitpunkt „vorher“ ein Unterschied zwischen der GFP der Test- und der Kontrollreize besteht. Über alle Geruchsbedingungen hinweg ist der Unterschied signifikant ($p=0,002$; sic!). Schwerpunktmäßig zeigen dies vor allem die Geruchsbedingungen „kongruent“ ($p=0,019$) und „inkongruent“ ($p=0,044$) (siehe Abbildung 35). Es erscheint bei einem Blick in die Datentabelle nicht das Werk weniger Versuchspersonen mit Extremwerten zu sein, sondern eine konstante Tendenz bei vielen Datensätzen.

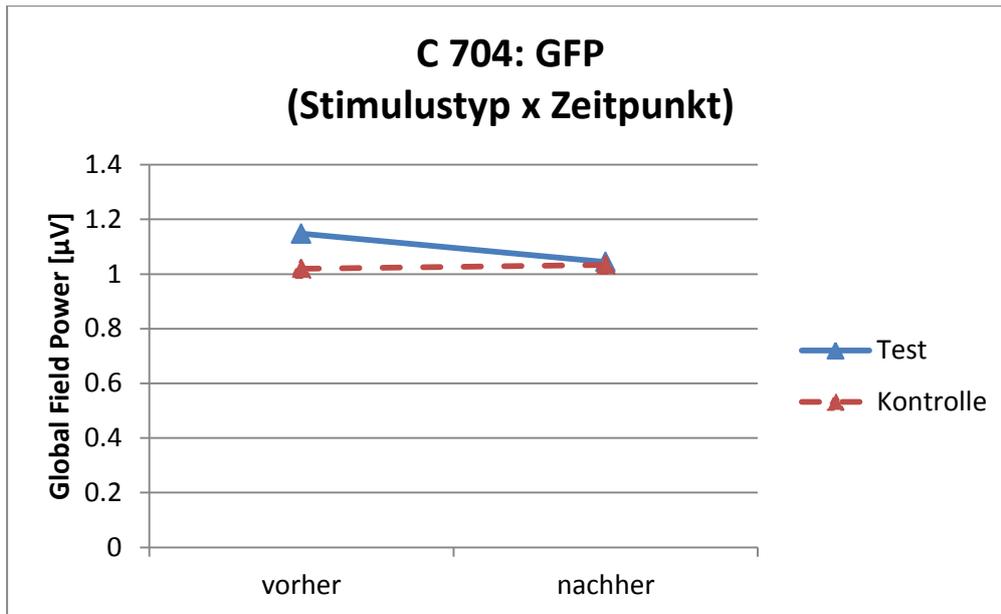


Abbildung 23 - C704, Interaktion Stimulustyp x Zeitpunkt ($F(1,38)=4,56$; $p<0,0393$). Zum Zeitpunkt „vorher“ wird der Unterschied zwischen Test- und Kontrollreizen im t-Test signifikant ($p=0,002$), zum Zeitpunkt „nachher“ nicht.

Hinsichtlich der Centroide konnten verschiedene Einflüsse festgestellt werden. In der Varianzanalyse wurde der positive Centroid in Posterior-Anterior-Richtung (y-Achse) durch die Faktoren „Zeitpunkt“ ($F(1,38)=7,18$; $p<0,0108$; vorher: 59,25%, nachher: 55,79%) und „Stimulustyp“ ($F(1,38)=5,63$; $p<0,0228$; Test: 59,13%, Kontrolle: 55,9%) jeweils separat beeinflusst. Es zeigt sich in gezielten t-Tests, dass Kontroll- und Testreize tendenziell wieder vorher einen Unterschied aufweisen ($p=0,010$ über alle Geruchsbedingungen; Test: 61,88%, Kontrolle: 56,99%), welcher nachher verloren geht ($p>0,5$). Am ehesten ist dies der Veränderung bei den Testreizen im Vorher-Nachher-Vergleich zuzuschreiben. Hier verlagert sich der positive Centroid von der y-Achsenposition 61,88% nach 56,88% mit einem Signifikanzniveau von $p=0,049$.

Was den negativen Centroiden betrifft, so wird deutlich, dass er in Posterior-Anterior-Richtung vom Stimulustyp beeinflusst wird (ANOVA, $F(1,38)=5,61$; $p<0,0231$) und hinsichtlich der Links-Rechts-Achse eine Wechselwirkung „Stimulustyp“ x „Zeitpunkt“ besteht ($F(1,38)=5,55$; $p<0,0238$) (siehe Abbildung 24). Bezogen auf diese „Stimulustyp“ x „Zeitpunkt“-Interaktion lässt sich mittels t-Tests nachvollziehen, dass hier kein Unterschied zwischen Test- und Kontrollreizen zum Zeitpunkt vorher ($p>0,1$), sondern nur zum Zeitpunkt nachher besteht ($p=0,026$).

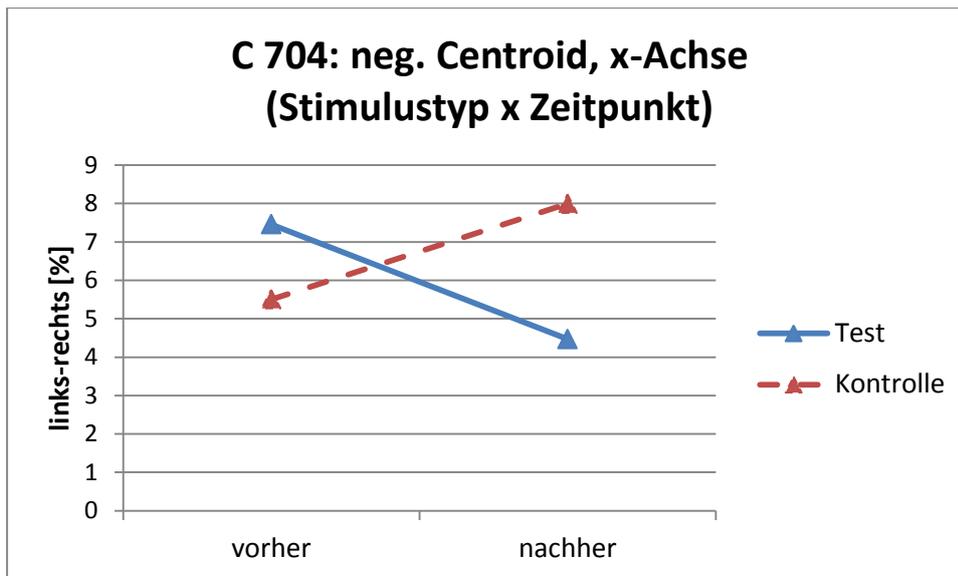


Abbildung 24 - Interaktion Stimulustyp x Zeitpunkt, C704, neg. Centroid ($F(1,38)=5,55$; $p<0,0238$). Durch das Lernen von Zeichen erfolgt eine signifikante Bewegung des negativen Centroiden der durch diese Symbole evozierten Potentiale in Richtung Mittellinie. Kontrollreize verhalten sich gegenläufig. Der Unterschied zwischen Test- und Kontrollreizen wird erst zum Zeitpunkt „nachher“ signifikant ($p=0,026$; zweiseitig, gepaart).

Zeitfenster 810-929 ms (C 865)

Das letzte Zeitfenster, von 810 bis 929 ms mit einer mittleren Latenz von 865 ms birgt eine Besonderheit. Die Versuchsperson E-55 wies im gesamten Bereich kein Maximum der GFP auf, jedoch wollte man wegen diesem Umstand nicht die gesamte Komponente verwerfen. Alle anderen Probanden liefern hier nämlich brauchbare Daten. Aus diesem Grund erfolgte die Auswertung dieser Komponente ohne die Daten dieser einen Versuchsperson.

Für die Latenz findet sich in der Varianzanalyse eine Wechselwirkung „Geruchsbedingung“ x „Stimulustyp“ ($F(2,37)=4,03$; $p<0,0260$) (siehe Abbildung 25).

Die Global Field Power scheint durch den Faktor „Stimulustyp“ alleine beeinflusst zu werden ($F(1,37)=6,08$; $p<0,0184$; Test: $0,91 \mu V$, Kontrolle: $0,97 \mu V$).

Für die Centroide dieser Komponente lagen keine signifikanten Ergebnisse vor.

C 865: Latenz (Geruchsbedingung x Stimulustyp)

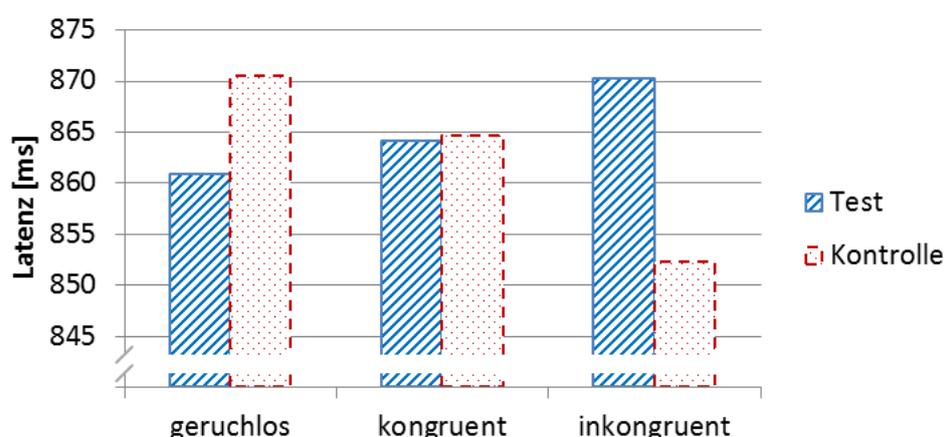


Abbildung 25 – Komponente C865: Interaktion der Faktoren „Geruchsbedingung“ x „Stimulustyp“ ($F(2,37)=4,03$; $p<0,0260$)

Übersicht

Im Folgenden ist eine Tabelle aufgeführt, die dem Leser eine Übersicht über alle signifikanten Ergebnisse der Varianzanalysen bieten soll. Dargestellt sind auf einem Niveau von $p<0,05$ signifikante Einflussfaktoren und Interaktionen, wobei jeweils nur die weitestgehende Wechselwirkung Erwähnung findet. Die Spalten stehen für die einzelnen Komponenten. In den Zeilen jeweils aufgetragen sind Latenz und Amplitude des zugehörigen GFP-Maximums, sowie die jeweils zwei Achsen der beiden Centroide.

Tabelle 1 – Übersicht über die Varianzanalysen. Nur signifikante Ergebnisse und weitestgehende Interaktion. Die Faktoren und ihre Faktorstufen sind: G = Geruchsbedingung (geruchlos, kongruent, inkongruent), S = Stimulustyp (Test, Kontrolle), Z = Zeitpunkt (vorher, nachher). Man beachte, dass für die Komponente C704 bezüglich des positiven Centroiden (y-Achse) keine Interaktion, sondern ein getrennter Einfluss der beiden Faktoren „Zeitpunkt“ und „Stimulustyp“ besteht.

	C117	C215	C407	C704	C865
Latenz	G x Z	G	-	G x S	G x S
GFP	G x Z x S	-	-	S x Z	S
pos Centr X	Z	Z	-	-	-
pos Centr Y	Z	G x S	-	S / Z	-
neg Centr X	-	-	-	S x Z	-
neg Centr Y	Z	-	-	S	-

Diskussion

Verhalten

Insgesamt lernten die 81 Versuchspersonen überraschend gut die 40 Kanji-Zeichen in der zunächst eher gering scheinenden Zeit von 20 Minuten. 28 Personen erreichten sogar die Höchstpunktzahl. In den folgenden Abschnitten werden die lernpsychologischen Aspekte des Experimentes erläutert. Ab Seite 76 werden dann die Ergebnisse der Elektrophysiologie diskutiert.

Kontextabhängiges Lernen mit Gerüchen

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, nachzuvollziehen, ob beim Erlernen japanischer Zeichen Geruch als Kontextfaktor eine Rolle spielt. Wie bereits in der Einleitung dargelegt, läge so genanntes kontextabhängiges Lernen vor, wenn die Gruppen, bei denen sich die Umgebungsbedingung bei Lernen und Test nicht unterscheidet, bessere Ergebnisse bei der Überprüfung des Gelernten liefern, als jene Gruppe, bei der sich der Zustand ändert. Diese Zustandsänderung wurde durch das Manipulieren des Umgebungsgeruches erreicht. Eine Gruppe mit der Bezeichnung „geruchlos“ erhielt lediglich gewöhnliche Raumluft sowohl beim Lernen als auch beim Abrufen. Eine Gruppe „kongruent“ roch sowohl beim Lernen als auch beim späteren Abrufen Zitronengeruch, während die letzte Gruppe („inkongruent“) beim Lernen zunächst Zitronen-, beim Test jedoch Fichtengeruch wahrnahm.

Daher hätte die Anzahl richtiger Antworten beim Benennen der gelernten „Kanji“-Zeichen in der Gruppe, deren Test- und Lernbedingung inkongruent sind, statistisch signifikant niedriger sein müssen. Dies war jedoch nicht der Fall. Tatsächlich erscheint es so, als verhielten sich die Daten sogar ein wenig entgegen dieser Erwartung. Dies beobachteten auch Morrin und Rathneshwar (2003). Anders ausgedrückt, ist für diesen experimentellen Aufbau auf der Verhaltensebene kein Effekt des Umgebungsgeruches im Sinne kontextabhängigen Gedächtnisses nachweisbar.

Literaturquellen (z.B. Herz, 1997; Pointer und Bond, 1998; Aggleton und Waskett, 1999; Cann und Ross, 1989) hätten eigentlich anderes vermuten lassen. Es gilt nun einige mögliche Gründe für dieses Versagen im Experiment zu diskutieren.

Erstens könnten Versuchspersonen, wie in Einzelfällen auch berichtet, eine sehr eigene, innere Logik zum Lernen der Symbole benutzt haben. Solche inneren Prozesse sind bekannt dafür, Kontexteffekte zu reduzieren (McDaniel et al., 1989, S. 527; Smith und Vela, 2001). Ferner ist es möglich, dass der Geruch als Kontextfaktor

im Zusammenhang mit anderen, z.B. dem vorher unbekanntem Raum oder der störenden EEG-Haube, zu schwach war, um eine relevante Bedeutung bei der Enkodierung zu erlangen. Dies würde bedeuten, dass der Geruch im Sinne von „Überschattung“ (Smith und Vela, 2001) gar nicht als relevant mit abgespeichert wurde.

Zweitens bediente man sich in dieser Arbeit der listengestützten Wiedergabe, um die Lernleistung zu beurteilen. Dies vereinfacht zwar die Auswertung, doch ist es möglich, dass hierdurch eventuell vorhandene Effekte des Kontextes reduziert wurden (Smith, Glenberg und Bjork, 1978; Smith und Vela, 2001). Weiterhin ist festzustellen, dass 28 von 81 Personen (34,6%) die Höchstpunktzahl von 40 richtig erlernten japanischen Vokabeln erreichten. Dies wirkt sich auch auf die Verteilung der Ergebnisdaten aus, die dadurch eher rechtslastig erscheint. Man kann also davon ausgehen, dass bei etlichen Versuchspersonen die Leistungsgrenze noch nicht ausgereizt war. Die Aufgabe war somit für das sehr akademische Versuchspersonenkollektiv prinzipiell zu einfach zu lösen. Schlussendlich könnte dies sogar dazu geführt haben, dass sie in der Lernphase übrige Zeit nutzen konnten, um oben beschriebene weiterführende, innere Gedächtnisstützen zu erzeugen. Auch wenn zeitkritisches und damit oberflächliches Lernen unterschiedlich bewertet wird (Smith, 1986; Smith und Vela, 2001), so liegt doch auf eine gewisse Art und Weise nahe, dass ein schwierigerer Test, z.B. mit einer höheren maximalen Punktzahl, oder ein weniger lernerprobtes Teilnehmerfeld eventuell die Ansprechbarkeit für Kontexteffekte erhöhen würde.

Drittens erscheint ein mentales Wiederherstellen der Lernbedingungen, wie bei Smith und Vela (2001) beschrieben, aus rein subjektiver Sicht eher unwahrscheinlich. Die Versuchspersonen wussten vor dem Beginn des Experimentes, dass Geruch eine Rolle spielt. Hieraus resultiert eigentlich, dass sie einer Änderung des Geruches eher offen gegenüber treten und nicht seinen Einfluss zu negieren versuchen sollten. Keine Versuchsperson erwähnte im Freitext-Antwortfeld des Fragebogens oder im Gespräch mit dem Versuchsleiter diese Technik. Tatsächlich hätte man, um diesen Faktor sicher auszuschließen, eventuell nachträglich danach fragen sollen, ob ein solcher Versuch des mentalen Wiederherstellens unternommen worden war, oder nicht.

Insgesamt ist nicht sicher davon auszugehen, dass die beobachteten Ergebnisse auf ein echtes Fehlen der Kontextbedeutung von Gerüchen zurückgehen. Es ist auch möglich, dass der hier benutzte Aufbau für die Messung eines angenommenen, eher schwachen Effektes der Gerüche im Rahmen von kontextabhängigem Lernen ungeeignet war. Der Vorteil der benutzten Methode ist es jedoch, dass sie mit dem EEG-Experiment kombiniert werden konnte. Für dieses war es nämlich erforderlich,

möglichst deutliche verhaltensbedingte Unterschiede zwischen den gelernten Test-Reizen und den nicht gelernten Kontroll-Reizen zu erzeugen. Hieraus folgte, dass die Versuchspersonen zumindest die allermeisten, besser noch alle zu lernenden Zeichen auch wirklich mit ihrer ganzen Bedeutung verinnerlicht haben sollten. In letzter Konsequenz ergibt sich unweigerlich, dass sensiblere Testverfahren für den Verhaltensanteil des Versuches zu unschärferen elektrophysiologischen Ergebnissen geführt hätten.

Einfluss anderer Faktoren

Obwohl hinsichtlich der affektiven Beurteilung zwischen der Raumluft und den beiden Gerüchen ein Unterschied besteht, hatte dieses subjektive Geruchsempfinden keinen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen. Dies ist anhand der fehlenden Korrelationen zwischen den Faktoren „Allgemeine Laune“, „Evaluation des Geruches in Phase 1“, „Evaluation des Geruches in Phase 2“ und „Anzahl richtiger Antworten“ zu sehen.

Allerdings ergibt sich ein Effekt der „Zeichen-Kategorie“, d.h. welcher semantischen Klasse das Zeichen angehörte. Die Kategorie C („Leben“, d.h. z.B. „Mutter, Hand, Auge, Reis“ etc.) wird offenbar etwas besser von den Versuchspersonen gelernt, als die anderen Kategorien. Dies sind Zahl (A, z.B. „fünf“), Eigenschaft (B, z.B. „wenig“) und Natur (D, z.B. „Felsen“). Bezogen auf das Experiment ist dies allerdings unkritisch. Vor allem gilt dies für die Elektrophysiologie, da erstens dort die Kategorien nicht getrennt betrachtet werden und außerdem weil Test- und Kontrollreize die gleiche Anzahl an Symbolen aus dieser Kategorie enthalten. Außerdem ist der Unterschied nominal sehr klein (siehe Abbildung 10 auf S. 55) und wird nur bei Betrachtung des Gesamtkollektivs (n=81) signifikant. Für die beiden einzelnen Versuchsteile separat wird die Signifikanzschwelle nicht erreicht ($p > 0,05$)

Elektrophysiologie

In den folgenden Abschnitten werden die elektrophysiologischen Ergebnisse interpretiert und diskutiert. Zunächst erfolgt ein kurzer Vergleich zwischen den durch Kanji-Zeichen und den durch Schachbrettmuster evozierten Potentialen. Danach werden zwei Einflussfaktoren dargestellt, die anhand der Daten eine besondere Rolle spielen: Lernen und der Messzeitpunkt. Zuletzt schließlich werden die Einflüsse der Gerüche aufgegriffen. Die vorangestellten Punkte zuerst zu erläutern ist notwendig, da Gerüche in dieser Arbeit nicht nur alleine einen Einfluss ausüben, sondern auch diese anderen beiden Aspekte modulieren.

Symbole erzeugen eine P100-artige Komponente

Zunächst fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse auf, dass noch ungelernete Kanji-Zeichen und bewährte Schachbrettmuster bei Anwendung des gleichen Zeitfensters von 90-149 ms durchaus eine ähnliche Komponente erzeugen. Sie unterscheiden sich aber hinsichtlich der Latenz, der Global Field Power und des positiven Centroiden, weshalb man nicht von der gleichen Komponente sprechen kann und hier daher der Begriff „P100-artig“ benutzt wird. Dieser beobachtete Unterschied lässt sich prinzipiell den physikalischen Besonderheiten der Reizart (Kanji und Schachbrettmuster) zuschreiben, weil ungelernete Kanji noch keine Bedeutung für die Versuchspersonen haben und somit zumindest in erster Linie die graphischen Eigenschaften dieser Symbolschrift zum Tragen kommen.

Die hiesigen Beobachtungen sind konsistent mit den Ergebnissen anderer Arbeiten. Skrandies und Chiu (2003) beschrieben auch eine P100-artige Komponente für von Muttersprachlern gesehene chinesische Schriftzeichen, deren topographische Verteilung der hier gezeigten sehr ähnlich ist. Bei Shinoda und Skrandies (2013) entspricht die Position des positiven Centroiden auf der Links-Rechts-Achse vor dem Lernen fast schon numerisch der hiesigen. Mehr hierzu entnehmen man Seite 81.

Ein solcher Unterschied, bedingt durch die rein physikalischen Eigenschaften des Reizes, ist nicht verwunderlich, zumal das P100 für seine Empfindlichkeit diesen gegenüber bekannt ist (Bodis-Wollner, 1986). Die leichte Rechts- und Anteriorverlagerung des positiven Centroiden scheint auf eine stärkere Involvierung anderer Gehirnareale hinzuweisen, als dies für das klassische P100 zu beschreiben wäre (Skrandies, 2005). Man beachte, dass in der topographischen Karte (Abbildung 14 auf Seite 61) für Kanji eine beidseitig occipito-temporale Verteilung des positiven Ladungsbereiches mit einer leichten Rechtsbetonung zu erkennen ist. Keinesfalls handelt es sich um eine bloße Verschiebung der gleichen Ladungsverteilung wie beim Schachbrett-P100, die in der Regel deutlich symmetrisch und occipital ist. Dies bedeutet, dass andere oder anders orientierte Generatoren für die gemessene evozierte elektrische Hirnaktivität verantwortlich sind. Diese Ergebnisse sind gut vereinbar mit gängigen Theorien über die Bedeutung nicht-occipitaler Hirnareale bei der Verarbeitung komplexer visueller Stimuli (Mishkin, Ungerleider und Macko, 1983; Eysel und Grüsser-Cornehls, 2005, S. 403). Eine gewisse Dominanz der rechten Hemisphäre bei visuell-räumlichen Aufgaben im Allgemeinen ist ebenfalls länger bekannt (Birbaumer und Schmidt, 2005a), wobei natürlich der Zeitpunkt dieser

Dominanz im Verarbeitungsprozess durch klassische Läsionsstudien nicht aufgeschlüsselt werden kann.

Schließlich lässt sich sagen, dass bei der visuellen Verarbeitung japanischer Kanji-Symbole eine P100-artige Komponente mit einer Latenz von 117 ms auftritt, deren positiver Anteil occipito-temporal verteilt ist und mit einer gewissen Rechtsbetonung vorliegt. Dies kann auf die Eigenschaften der Stimuli zurückgeführt werden und ist konsistent mit Literaturdaten.

Lerneffekte

Interpretation

Wir wissen, dass Kontroll- und Testreize vor dem Lernen keine Unterschiede aufweisen dürften. Bei der zweiten Messung schließlich erwarten wir als Resultat des Lernens eine Diskrepanz zwischen diesen beiden Stimulustypen. Aus diesem Grund kann man davon ausgehen, dass ein Lernerfolg nicht als einzelner Faktor, sondern als Interaktion „Stimulustyp“ x „Zeitpunkt“ von der ANOVA wiedergespiegelt wird.

Solche Effekte fanden sich in insgesamt drei Fällen. Zwei davon entfallen auf die Global Field Power der Komponenten C117 und C704, wobei erstgenannte auch durch die Geruchsbedingung moduliert und daher im Abschnitt „Der Einfluss von Gerüchen“ ab Seite 86 besprochen wird. Der dritte Fall betrifft den negativen Centroiden der Komponente C704.

Für die genannte Amplitude der Global Field Power der Komponente C704 stellt sich hier heraus, dass die aufgezeigte Interaktion auf einen Unterschied zwischen Kontroll- und Testreizen vor und nicht nach dem Lernen zurückzuführen ist. Dieser Effekt ist nicht ohne Weiteres zu erklären, weil er dem Versuchsaufbau grundlegend widerspricht. Es scheint hier ein unbekannter Einflussfaktor vorzuliegen. Anhand der vorliegenden Beobachtung kann davon ausgegangen werden, dass für diesen Parameter der Komponente 704 kein auswertbarer Lerneffekt abgeleitet werden kann. Es bleibt lediglich zu diskutieren, ob der Anstieg der GFP-Amplitude für Kontrollreize von „vorher“ zu „nachher“ noch auf einen Einfluss des „Zeitpunktes“ zurückgeführt werden kann, wie auf Seite 78 ausgeführt.

Der einzige dem Lernen zuzuordnende topographische Effekt liegt für die Links-Rechts-Position des negativen Centroiden im Zeitbereich C704 vor. Es handelt sich um ein sehr deutliches Ergebnis, weil sich ein Unterschied zwischen Test- und

Kontrollreizen auch im t-Test erst nach dem Lernen zeigt. Die Ergebnisse sind daher in einer nach dem Paradigma sinnvollen und gut erklärbaren Konstellation.

Frühes semantisches Lernen

In dieser Dissertation wurde – auch aus technischen Gründen – keine wirkliche Unterscheidung zwischen den verschiedenen semantischen Klassen der japanischen Symbole vorgenommen. Dies bedeutet, dass es anhand der vorliegenden Arbeit nicht möglich ist, Effekte aufzuzeigen, die den Zeitpunkt unterschiedlicher Verarbeitung der verschiedenen semantischen Kategorien genauer eingrenzen. Der Nachweis eines solchen Effektes wäre jedoch erforderlich, um sicher zu stellen, wann genau die beobachteten Lerneffekte tatsächlich von der Verarbeitung der Bedeutung herrühren. Alternativ ist es möglich, dass die Tatsache des intensiven Arbeitens mit den gelernten Test-Stimuli alleine schon zu den gezeigten Ergebnissen führt. Dies wäre dann als nicht-semantisches Lernen im Sinne eines reinen Wiedererkennungseffektes zu werten.

Grundsätzlich ist allerdings die Annahme früher semantischer Verarbeitung anhand des Standes der Wissenschaft gerechtfertigt (Skrandies, 1998; Hiessl, 2010; Hiessl und Skrandies, 2013). Die in dieser Arbeit beobachteten Lerneffekte gehen daher mit großer Sicherheit auf semantisches Lernen zurück.

Hemisphäreneffekte

Im Vergleich zu Schachbrettmustern war die P100-artige Komponente mit ihrem positiven Ladungsschwerpunkt unabhängig vom Erlernen nach rechts lateralisiert, während das Erlernen der Bedeutung im Zeitraum der Komponente C704 zu einer relativen Verlagerung des negativen Centroiden nach links führt.

Die linke Hirnhälfte gilt als „dominant“ für Sprache (Birbaumer und Schmidt, 2005a), was allerdings nicht bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt die Hirnaktivität betont linksseitig größer ist. Viel eher hat die linke Hemisphäre eine gewisse Schlüsselrolle bei der Verarbeitung und Produktion von Sprache, wie dies bei Patienten mit Hirnschäden zu beobachten ist. Aber auch Schäden an der rechten Hemisphäre führen zu Beeinträchtigungen in der Verarbeitung von Wortbedeutungen (Joanette, Goulet und Le Dorze, 1988, auch zitiert in Skrandies, 1998). Bei gesunden Menschen tragen bis einschließlich dem P100 in erster Linie beide Hirnhälften oder sogar mehr die rechte zur Verarbeitung visuell dargebotener Sprachreize bei (Zouridakis et al., 1998; Kutas, van Petten und Besson, 1988; Hiessl und Skrandies, 2013), wie es in dieser Dissertation auch der Fall ist. Außerdem kann das Erkennen von Symbolen und

Einzelworten auch unabhängig von Sprachzentren ablaufen. Beide Hemisphären sind offenbar hierzu in der Lage (Zaidel, 1976 zitiert in Skrandies, 1998).

Linkshemisphärisch betonte Aktivität wird meist erst nach dem Zeitfenster der P100-Komponente beobachtet (Key, Molfese und Ratajczak, 2006; Yen Na Yum, 2011; Wei et al., 2001; Zouridakis et al., 1998). Wei et al. (2001) vermuten, dass zwar das N160 für Sprachreize betont links auftritt, dieser Aktivität jedoch eine rechthemisphärische Verarbeitung voraus geht. Sprache wird also grundsätzlich von beiden Hemisphären verarbeitet.

Man könnte nun argumentieren, die Ergebnisse dieser Dissertation seien mit Tan et al. (2000) in direkten Einklang zu bringen. Sie fanden in einer fMRT-Untersuchung betonte Aktivierungen von rechts occipitalen und links frontalen Hirngebieten beim lesen chinesischer Worte durch Muttersprachler. Deren occipitale Aktivität wäre dementsprechend mit der rechtsbetonten (positiven) C117-Position und die links-frontale Aktivität mit der Linksverlagerung des negativen Anteils des C704 für bedeutungsvolle Reize vereinbar. Die Linksverlagerung, auch wenn sie die Mittellinie nicht überschreitet, spricht durchaus für eine zunehmende Aktivierung linksseitiger Areale. Eine direkte Übertragung von Ergebnissen zwischen den sehr unterschiedlichen Methoden ist zwar problematisch, diese Daten ergänzen sich aber durchaus gegenseitig.

Greift man die Ausführungen von Wei et al. (2001) vor dem Hintergrund der hiesigen Ergebnisse und der Arbeit von Tan et al. (2000) auf, so bietet sich eine weitere mögliche Hypothese über den zeitlichen Ablauf der visuellen Verarbeitung der erlernten Symbole an. Sie könnten als Hinweise für die zumindest teilweise sequenzielle Abfolge von rechts occipital betonter, eher rudimentärer Prozessierung und später folgender, links hemisphärisch betonter, linguistischer Verarbeitung gedeutet werden. Allerdings zeigen z.B. Hiessl und Skrandies (2013), dass neben den reinen primären visuellen Prozessen schon früh Aspekte von Bedeutungsdimensionen Einfluss auf die evozierte Aktivität bei ca. 100 ms ausüben, was als Argument gegen die reine Formerkennung in diesem Zeitraum zu werten ist.

In der Zusammenschau scheinen beide Hemisphären, jedoch mit unterschiedlicher Gewichtung zu unterschiedlichen Zeitpunkten, eine Rolle bei der Verarbeitung visuell dargebotener japanischer Symbole zu spielen.

Effekte des „Zeitpunktes“ – Zeichen der Ermüdung?

Interpretation

In der Varianzanalyse (siehe S. 61ff) wird deutlich, dass vor allem bei den beiden ersten Komponenten C 117 und C 215 ein Effekt entsteht, welcher von vorher nach nachher rein auf einer Auswirkung des Faktors „Zeitpunkt“ basiert (siehe auch Tabelle 1 auf S. 73). Das Lernen oder die Geruchsbedingung spielen dabei statistisch gesehen keine Rolle.

Wesentliche Information bezüglich des Einflussfaktors „Zeitpunkt“ ist, dass zwischen der ersten und der zweiten Messung bei derselben Versuchsperson eine gewisse Zeit verstrichen ist. Außerdem wurden die gleichen Reize wiederholt dargeboten. Dies heißt also, dass ein reiner Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ entweder auf der repetitiven Darbietung der Symbole, der reinen abgelaufenen Zeit oder auf einer Mischung aus beidem beruht. Es handelt sich daher möglicher Weise um eine Auswirkung veränderter neuronaler Erregungsmuster auf einer oder mehrerer Ebenen des Weges von der Reizdarbietung auf dem Bildschirm bis zur Messung der kortikalen elektrischen Aktivität.

Die Latenz weist für die Komponente C117 eine solche Erscheinung auf, welche aber durch die Geruchsbedingung moduliert und daher nochmals weiter unten unter „Der Einfluss von Gerüchen“ (S. 85) besprochen wird.

Insgesamt sind durch den Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ vor allem topographische Veränderungen zu beobachten. Dies gilt für den positiven Centroiden auf der Links-Rechts-Achse für beide Komponenten C117 und C 215. Die P100-artige Komponente C 117 zeigt diesen Einfluss zusätzlich auf deren Posterior-Anterior-Achse. Außerdem wird der negative Centroid in Posterior-Anterior-Richtung zu diesem Zeitpunkt ebenfalls hierdurch beeinflusst (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19 auf Seite 67, sowie Seite 67 ff.).

Shinoda und Skrandies (2013), deren Paradigma als Grundlage für diese Arbeit dient, konnten sehr ähnliche Ergebnisse zeigen. Für das P100, hier C117 genannt, beobachteten sie ebenso einen rein zeitabhängigen Anstieg der Global-Field-Power-Amplitude und eine Verlagerung des positiven Centroiden von eher rechts (ca. +4% absolut auf der Links-Rechts-Achse) in Richtung Sagittallinie. Ein Lerneffekt im Sinne einer Interaktion „Stimulustyp x Zeitpunkt“ hatte eine Rechts- und Anteriorverlagerung des negativen Centroiden der durch Testreize evozierten P100-Komponente zur Folge.

Die Zusammenschau der Ergebnisse beider Arbeiten, vor allem mit Bezug auf die Veränderungen der Centroidpositionen, begründet die Annahme, dass hier nahezu identische Mechanismen vorliegen. Grundsätzlich beobachteten Shinoda und Skrandies (2013) eine sehr ähnliche Veränderung der gleichen Parameter. Wesentlicher Unterschied ist, dass dort in bestimmten Fällen eine Interaktion „Stimulustyp“ x „Zeitpunkt“ im Sinne eines Lerneffektes einen signifikanten Einfluss hatte. Diesen konnte die vorliegende Arbeit nicht zeigen. Ein möglicher Grund könnte die hier geringere mittlere Lernleistung durch die verdoppelte Anzahl der Symbole sein. Dies war allerdings nötig, um eine parallele Testung von Elektrophysiologie und Verhalten möglich zu machen (siehe S. 74 ff.).

Es ist demnach anzunehmen, dass die Beobachtungen beider Arbeiten auf einen wesentlichen allgemeinen Einfluss der wiederholten Darbietung der Symbole („Zeitpunkt“) zurückgehen und zusätzlich ein schwächerer Effekt des Erlernens der Symbole vorliegt.

In diesem Abschnitt der Diskussion wird wegen der fehlenden statistischen Signifikanz zunächst streng davor ausgegangen, dass für die o. g. topographischen Veränderungen kein semantischer Lerneffekt verantwortlich ist. Die Frage ist nun, welche Faktoren zu diesen Veränderungen im Zeitverlauf führen.

Klassische Anpassungseffekte

In der vorliegenden Dissertation wurden keine Versuche unternommen, die Adaptation oder Habituation innerhalb eines EEG-Messblockes „vorher“ oder „nachher“ genauer zu untersuchen. Was wir hier sehen können, sind nur die Veränderungen zwischen den Messblöcken. Es wurde für meist ca. 25 Minuten zwischen den Messungen pausiert.

Für meist deutlich kürzere Zeitbereiche gibt es Berichte über Adaptation bzw. Habituation, auch wenn einige Autoren diese nicht exakt gegeneinander abgrenzen. Habituation, d.h. Gewöhnung, bezeichnet den Vorgang, dass wiederholt dargebotene Reize als unwichtig erkannt werden und eine geringere Antwort des Organismus hervorrufen. Adaptation bezeichnet die Erhöhung der Reizschwelle eines Sinnesorgans beziehungsweise die Verringerung der Antwort desselben auf die gleiche Reizintensität (Birbaumer und Schmidt, 2005b). In einer Untersuchung von Áfra et al. (1998) mit 25 gesunden Probanden über insgesamt 15 Minuten mit 2 Minuten je Block zu 100 Stimulationen durch Schachbrett-VEPs sanken die Amplituden von N1-P1 und P1-N2 um über 20% vom ersten zum letzten Block. Woestenburg, Verbaten und Slangen (1983) berichten über eine allgemeine Abnahme der Amplituden von

einem Versuchsblock zum nächsten für komplexe und einfache visuelle Stimuli. Auch hier ist die erfasste Zeitspanne im Bereich von wenigen Minuten anzusiedeln. Zu bemerken ist, dass sie für den Bereich von 90 bis 220 ms an der Elektrode Oz nur im ersten Block eine Abnahme der Amplitude feststellen. Ferner postulieren sie eine Wirkung der Reizwiederholung innerhalb des zweiten Darbietungsblockes im Zeitfenster von 620-780 ms, welches eine überraschende Übereinstimmung mit dem davon unabhängig festgelegten Zeitfenster der hiesigen Komponente C704 hat.

Heinrich und Bach (2001) hingegen konnten zwar auch Adaptationseffekte bei der kontinuierlichen Messung von VEPs feststellen, jedoch sind diese interindividuell sehr unterschiedlich und auch nur für durchgängige oder sehr kurz unterbrochene (2 s) Stimulation nachweisbar. Diese Autoren vermuten, dass Aufmerksamkeit oder Erregung hierbei eine große Rolle spielen.

Wie unschwer zu erkennen ist, beschränken sich zumindest diese Berichte meist auf die Amplitude. Die verringerte Amplitude einer ERP-Komponente im klassischen Sinn entspricht im Fall der hier vorliegenden Arbeit am ehesten eine Reduktion der Global Field Power zum entsprechenden Zeitpunkt, wenn bei weitestgehend gleicher Topographie ein Verlust von Potentialgradienten erfolgt. Dies beobachten wir hier - mit Ausnahme der Testreize in der Geruchsbedingung „inkongruent“ – nicht. Im Gegenteil: Die Global Field Power steigt zum Teil sogar an. Mit Bezug auf Seite 16 ff. ist allerdings festzuhalten, dass die oben genannten Autoren vornehmlich Messungen an Einzelelektroden ohne quantitative Berücksichtigung der Topographie vorgenommen haben. Eventuelle Habituations- oder Adaptationseffekte könnten im Rahmen dieser Arbeit daher theoretisch durchaus als topographische Veränderungen auftreten.

Rein von der Konzeption der 80 verschiedenen, kontrollierten Kanji-Symbole ist es allerdings nahezu ausgeschlossen, dass auf der Ebene des visuellen Systems selbst eine Adaptation im engeren Sinne stattfindet. Eine größere Reizähnlichkeit wäre hierfür unabdingbar.

Eine Habituation, d.h. eine unterbewusste Kategorisierung der zu lernenden Test-Reize als „unwichtig“ mit konsekutiv verringerter Zuweisung neuronaler Ressourcen erscheint im engeren Sinne ebenso unwahrscheinlich, weil die Versuchspersonen sonst nicht derart hohe Lernraten auf der Verhaltensebene erzielt hätten.

In wie weit Aufmerksamkeit und Müdigkeit eine Rolle spielen könnten, wird im folgenden Abschnitt erörtert.

Aufmerksamkeit und Müdigkeit

Für einzelne Personen können VEPs stark von der Stimmung beeinflusst werden. Besonders subjektives Müdigkeitsgefühl, welches mit verringerter allgemeiner physiologischer Erregung überein zu bringen ist, führt zu verringerten Amplituden (Joost, Bach und Schulte-Mönting, 1992). Die allgemeine physiologische Erregung hat wiederum Einfluss auf Verhalten und physiologische Reizschwellen wie z.B. die EEG-Frequenz und Aufmerksamkeit (Cohen, Sparling-Cohen und O'Donnel, 1993).

Die grobe Aufmerksamkeit wurde in dieser Arbeit mittels der „Denkaufgabe“ während der Messungen überprüft. Allerdings wurde diese schnell sehr gut beherrscht, sodass es wahrscheinlich ist, dass der Zugewinn an Routine bei der Durchführung der Aufgabe den möglichen Verlust an Vigilanz oder Aufmerksamkeit überwog. In der Folge sind leichte Müdigkeit oder ein Aufmerksamkeitsverlust unter der Nachweisschwelle dieses eher rudimentären Tests (siehe S. 41 ff.).

Zur Aufmerksamkeit existieren zahlreiche Arbeiten, die allerdings vornehmlich „räumliche Aufmerksamkeit“ im peripheren Gesichtsfeld untersuchen. Beim zentralen Sehen [wie in diesem Experiment] hat so genannte "räumliche Aufmerksamkeit" eine deutlich untergeordnete Rolle (Ducrot und Grainger, 2007), was die Übertragbarkeit durchaus einschränkt. Dennoch ergänzen diese Versuche Joost, Bach und Schulte-Mönting (1992). Die Ergebnisse für Untersuchungen im peripheren Gesichtsfeld zeigen, dass ein Richten der Aufmerksamkeit auf bestimmte Stimuli zu erhöhten Amplituden führt und umgekehrt eine reduzierte Aufmerksamkeit zu reduzierten Amplituden (Mangun, 1995; Heinze und Mangun, 1995; Hillyard, Vogel und Luck, 1998, S. 1258). Solche Effekte sind für das P100 und die nachfolgende Negativität zwischen 140 und 190 ms beschrieben. Nach Cohen, Sparling-Cohen und O'Donnel (1993) und Picton (1992) weist das P300 unabhängig vom räumlichen Aspekt Zusammenhänge mit Aufmerksamkeit auf. Näätänen (1992) betont, bei erhöhter räumlicher Aufmerksamkeit würden keine anderen Generatoren angesprochen als bei verringerter. Topographische Veränderungen oder Veränderungen der Latenz gehören nach Näätänen (1992) und Hillyard, Vogel und Luck (1998) nicht zu den Phänomenen, die mit Aufmerksamkeit zu tun haben. Eine Arbeit von Fu et al. (2010) weist dennoch darauf hin, dass die Latenz mit geringerer Aufmerksamkeit größer zu werden scheint, was langsamerer Informationsverarbeitung entspricht (Skrandies, 1995, Skrandies, 2005).

Dies heißt in der Übertragung auf die vorliegende Dissertation, dass ein Abfall der GFP oder eine Vergrößerung der Latenz auch durch einen ein Abfall der Aufmerksamkeit

oder Wachheit bedingt sein kann. Allerdings lässt sich nach den o.g. Autoren eine topographische Veränderung, wie bei den Komponenten C117 und C215 beobachtet, nicht alleine auf einen Verlust an Wachheit oder Aufmerksamkeit zurückführen.

Frühe, nicht-semantische Übungseffekte

Für den Bereich des Wahrnehmungslernens sind frühe Trainingseffekte schon beschrieben (Skrandies und Fahle, 1994; Skrandies, 2006). Gemeint ist im engeren Sinne die Verbesserung sensorischer Leistung, die auch robuste elektrophysiologische Veränderungen nach sich ziehen kann (Skrandies und Fahle, 1994; Skrandies, 2006). Diese Art des Lernens ist jedoch absolut spezifisch für die jeweilige Reizart und – ausrichtung und misst vor allem Reizschwellen (Skrandies und Fahle, 1994). Dennoch sind wesentliche Gemeinsamkeiten vorhanden. Zentral hierbei ist, dass auf einer Ebene unterhalb der Zuschreibung von Bedeutung die Verarbeitung dieser Reize durch eben diese Übung beeinflusst wird.

Effekte des Wahrnehmungslernens sind von unter 100 ms bis über 600 ms nachweisbar (Skrandies und Fahle, 1994, S. 166). Latenz und Amplitude, die sich über verschiedene Versuche hinweg unterschiedlich verhalten, spielen hinsichtlich des Wahrnehmungslernens eine geringere Rolle als topographische Unterschiede. Es werden offenbar andere Konstellationen an Neuronen erregt, als dies vorher der Fall war. Ferner können diese Trainingsprozesse auch unterbewusst ohne explizites Lernen erfolgen (Skrandies, 2006). Daher ist das Konzept eines allgemeinen Übungseffektes für Kanji-Symbole, gelernt und ungelernt, ein möglicher Erklärungsansatz für die hier gefundenen Einflüsse der repetitiven Darbietung der gleichen Stimuli im Verlauf der Zeit.

Fazit: Zeitverlauf

Im zurückliegenden Abschnitt wurden klassische physiologische Anpassungseffekte, Aufmerksamkeit und nicht-semantische Trainingseffekte als Ursache für die topographischen Veränderungen diskutiert. Anpassungseffekte und Aufmerksamkeitsschwankungen werden vornehmlich als Amplitudeneffekte apparent, wobei erstere noch weniger mit topographischen Methoden untersucht sind, als letztere. Beide scheinen nach Literaturlage dennoch grundsätzlich kaum mit der Verlagerung von Ladungsschwerpunkten assoziiert zu sein. Übungseffekte auf einem Niveau unterhalb semantischer Verarbeitung sind jedoch sehr häufig mit eben besonders solchen Veränderungen in Verbindung zu bringen (Skrandies, 2006). Auch wenn eine eingeschränkte Übertragbarkeit vorherrscht, ist die plausibelste Erklärung für

die hier gezeigten Verlagerungen der Ladungsschwerpunkte durch den Faktor „Zeitpunkt“ ein allgemeiner Trainingseffekt der Versuchspersonen für Kanji-Symbole.

Der Einfluss von Gerüchen

Interpretation

Wie im Abschnitt „Kontextabhängiges Lernen mit Gerüchen“ auf Seite 74 klar wird, ist in dieser Arbeit kein Einfluss der manipulierten Umgebungsgerüche auf der Verhaltensebene nachzuweisen. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Elektrophysiologie, dass durchaus auch ohne solche Verhaltenseffekte Veränderungen hirnelektrischer Aktivität auftreten können.

Nur in wenigen Fällen in dieser Arbeit spielt der Faktor „Geruchsbedingung“ eine signifikante, aber dafür umso spannendere Rolle. Jede einzelne Beteiligung, ob als Einzelfaktor oder als Teil einer Interaktion bedeutet eine relevante Einflussnahme auf einen bestimmten elektrophysiologischen Parameter. Allerdings muss die Interpretation vorsichtig angegangen werden. Erstens sollte Bedacht werden, dass sowohl in der Bedingung „geruchlos“ als auch in der Bedingung „kongruent“ tatsächlich der Umgebungsgeruch von vorher zur nachher nicht wechselt, d.h. kongruent ist. Die Nomenklatur, die auf den ersten Blick nämlich etwas anderes suggeriert, soll dazu dienen, klar unterscheiden zu können, ob eben ein besonderer Geruch eingesetzt wurde, oder nur Raumluft. Wenn also diese beiden Faktorstufen ein ähnliches Verhalten zeigen, so ist dies der tatsächlichen Kongruenz der Umgebungsbedingungen zu den Zeitpunkten „vorher“ und „nachher“ zuzuschreiben. Zweitens beinhaltet die Bedingung „inkongruent“ ebenfalls Besonderheiten. Zum einen birgt sie die Information, dass in der Testphase ein zum Zitronengeruch inkongruenter, das heißt ein anderer Geruch benutzt wurde. Zum anderen bedeutet dies aber auch, dass eben der spezielle Geruch Fichte zum Einsatz kam. Es ist anhand der vorliegenden Daten demnach nicht zu unterscheiden, ob jetzt ein besonderer Effekt erreicht wird, weil ein anderer Geruch benutzt wird, oder eben Fichte im Speziellen.

Latenz

Eine interessante Wechselbeziehung ergibt sich im Hinblick auf die Latenz der Komponente C117. Geruchsbedingung und Zeitpunkt der Messung treten in eine signifikante Interaktion, was als Einflussnahme des Umgebungsgeruches auf den weiter oben genannten Effekt des Messzeitpunktes gewertet werden kann. Ausschließlich die Latenz der Bedingung „geruchlos“ ohne jeden besonderen

Umgebungsgeruch wird nennenswert größer. In anderen Worten wirkt es so, als verringere hier die Geruchsexposition im Allgemeinen („kongruent“ und „inkongruent“) gegenüber der reinen Raumluft die Latenz in diesem Zeitfenster, was als Zeichen beschleunigter Informationsverarbeitung gewertet werden kann (Skrandies, 1995, Skrandies, 2005). Außerdem hervorzuheben ist, dass auch zwischen den beiden Geruchsbedingungen „kongruent“ und „inkongruent“ ein Unterschied besteht. Während beim „kongruenten“ Darbieten von Zitronengeruch in Lern- und Testphase die Latenz nahezu gleich bleibt, wird sie bei einem Wechsel von Zitrone zu Fichte sogar noch geringer als vorher.

Eine Arbeit von Fu et al. (2010) weist darauf hin, dass die Latenz mit geringerer Aufmerksamkeit größer zu werden scheint, was langsamerer Informationsverarbeitung entspricht (Skrandies, 1995, Skrandies, 2005). Simple Ermüdung ist daher eine mögliche, in Anbetracht der auf Seite 84 geschilderten Literaturlage jedoch kritisch zu hinterfragende Begründung für die Zunahme der Latenz in der Geruchsbedingung „geruchlos“. Dementsprechend wäre die hieraus abgeleitete Schlussfolgerung, eine im Vergleich erhöhte Wachheit in den geruchexponierten Gruppen führe über allgemeine physiologische Erregung zu geringeren Latenzen. Sicher abzuleiten ist, dass Gerüche offenbar einem gewissen Effekt entgegenwirken, der zu einer Latenzerhöhung im Zeitverlauf führt.

Ohne sonstige Einflüsse zeigen die verschiedenen Geruchsbedingungen beim C215 signifikant unterschiedliche Latenzen. Dies bedeutet, dass dieser Parameter allgemein durch diesen Faktor moduliert wird. Erneut findet sich für die Bedingung „geruchlos“ die höchste Latenz, für „kongruent“ die zweithöchste und für „inkongruente“ die niedrigste. Man beachte, dass der Unterschied zwischen „kongruent“ und „inkongruent“ dieses Mal nicht auf den Fichtengeruch oder den Zustandswechsel zurückgeführt werden kann, weil dies einen Einbezug des Faktors „Zeitpunkt“ unbedingt erfordern würde. Viel eher ist dieses Ergebnis als allgemein verringerte Latenz dieser Komponente unter beliebiger Geruchsexposition zu werten und ebenfalls als Zeichen beschleunigter Informationsverarbeitung zu interpretieren. Hingewiesen sei ergänzend noch auf die Möglichkeit, dass dieser Latenzunterschied auch auf der Tatsache beruhen könnte, dass die vorhergehende Komponente bereits hinsichtlich ihrer Latenz durch die Geruchsbedingung beeinflusst und dieser Effekt sozusagen „hierarchisch“ an die nächste Komponente weitergereicht wurde (Näätänen, 1992). Dies ist allerdings für die direkte Interpretation der hiesigen Ergebnisse nicht von unmittelbarer Bedeutung.

Globale Feldstärke der Komponente C117

Die komplexeste Konstellation bietet die Global Field Power der Komponente C 117 im Zeitbereich von 90 bis 149 ms. Von allen Parametern in diesem Experiment ist sie der einzige, bei dem ein Einfluss der Geruchsbedingung auf das Lernen im Sinne einer Interaktion „Geruchsbedingung“ x „Zeitpunkt“ x „Stimulustyp“ nachzuvollziehen ist (siehe Abbildung 17 auf S. 66). Dieser Einfluss bedingt das unterschiedliche Verhalten der Daten der drei Geruchsbedingungen, auf das im Folgenden eingegangen wird.

Beide Reiztypen, Kontroll- und Teststimuli, erfahren in der Geruchsbedingung „kongruent“ (Zitrone – Zitrone) im Zeitverlauf eine recht gleichmäßige Vergrößerung der Global Field Power-Amplitude. Eine fehlende Ungleichheit der Mittelwerte für die Stimulustypen dieser Bedingung ist aus den t-Tests als wahrscheinlich anzunehmen. Dies bedeutet, dass innerhalb der Interaktion hier scheinbar kein oder fast kein Einfluss des Faktors „Stimulustyp“ vorliegt. Dies ist übereinstimmend mit Shinoda und Skrandies (2013). Daher gilt im Zusammenhang mit dem beobachteten topographischen Effekt bei dieser Komponente innerhalb der Geruchsbedingung „kongruent“, dass fast allein durch den Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ eine leichte Erhöhung der Latenz, die hier diskutierte Vergrößerung der Global Field Power und eine topographische Veränderung begründet ist.

In der Geruchsbedingung „inkongruent“ zeigt sich für ungelernte Kontrollreize die gleiche Tendenz, eine Vergrößerung der GFP nach sich zu ziehen, wie dies in der kongruenten Geruchsbedingung der Fall ist. Für gelernte Test-Reize jedoch gilt, dass sie eine geringere Aktivierungsstärke im Zeitverlauf zur Folge haben. Fasst man alle für diese Geruchsbedingung gültigen Aussagen bezüglich des C117 zusammen, ergibt sich folgendes Bild: Bei deutlich abfallender Latenz und der für alle Bedingungen zutreffenden topographischen Veränderung zeigen gelernte und ungelernte Zeichen innerhalb der Geruchsbedingung „inkongruent“ andere Feldstärken. Diese wird für Kontrollreize größer und für Testreize kleiner. Im hier geschilderten Fall scheinen gelernte Reize deutlich weniger neuronale Erregung hervorrufen, als ungelernte. Eigentlich könnte man denken, dass Training eine erhöhte Gesamtaktivierung zur Folge hat, weil stärkere synaptische Verbindungen ausgeprägt werden. Verringerte GFP-Amplituden sind zwar Ausdruck verringerter globaler neuronaler Erregung zu einem bestimmten Zeitpunkt (Skrandies, 2005), treten aber auch bei verringerten Gradienten zwischen den Messpunkten auf (siehe S. 50). Zumindest für das perzeptuelle Lernen ist bekannt, dass bei gesteigerter Leistung im Verhaltensbereich nicht zwingend kürzere Latenzen und größere Global Field Power auftreten müssen, sondern durchaus andere Konstellationen – auch mit verringerter GFP – möglich sind

(Skrandies, 2006). Es ist daher eine Hypothese, dass der Organismus im Verlauf für gelernte Reize weniger Bedarf an synchroner neuronaler Aktivierung in einem Gehirnbereich hat. Ein Grund könnten die deutlich vermehrten Assoziationen eines plötzlich mit Bedeutung verknüpften Symbols sein. Bei verstärkter Einbeziehung anderer Cortexareale verringern sich die Gradienten zwischen den Messpunkten, weshalb dann die GFP-Amplitude abfällt (siehe S. 50).

Zuletzt zeigt die Geruchsbedingung „geruchlos“ einen Abfall der GFP für Kontrollreize und kaum Veränderung bei den Testreizen, wobei ein Unterschied zwischen der GFP dieser beiden Reiztypen zum Zeitpunkt „vorher“ besteht. Letzteres bedeutet, dass die Ergebnisse dieser Geruchsbedingungen in diesem konkreten Fall extrem vorsichtig zu interpretieren sind, wie dies unter „Effekt des „Stimulustypen“ auf S. 91 genauer ausgeführt wird. Insofern wird in diesem Abschnitt vor allem auf die beiden anderen Geruchsbedingungen Bezug genommen.

Fazit: Geruchseinflüsse

Im Folgenden werden die o.g. Einflüsse auf Global-Field-Power-Amplitude und die Gipfellatenz zusammengefasst und als Gesamtkonzept diskutiert.

Vornehmlich der Wechsel des Geruches von Zitrone nach Fichte oder eine besondere Eigenschaft des Fichtengeruches führt zu beschleunigter Informationsverarbeitung, was an den Latenzen der Komponenten C117 und C215 zu sehen ist. Außerdem verändert dieser Effekt die neuronale Antwortstärke auf gelernte Symbole. Entgegen dem Trend, dass die Global Field Power des C117 von „vorher“ zu „nachher“ zunimmt, ist nur für die Geruchsbedingung „inkongruent“ eine Abnahme der GFP durch Testreize zu verzeichnen. Letzteres kann als besondere Wechselwirkung des neuen Geruches mit dem Erlernen der Zeichen interpretiert werden.

Einflüsse von Gerüchen auf evozierte Potentiale finden sich schon ab dem P100 (Lorig et al., 1993), sind aber auch gut für den Zeitbereich des P300 in verschiedenen Paradimen und Reizmodalitäten nachgewiesen (Lorig et al., 1993; Iijima et al., 1998, S. 745; Iijima et al., 2009; Bensafi et al., 2002). Die hier vorliegende Arbeit unterstützt diese Ergebnisse deutlich für den Zeitbereich des P100, aber auch für eine nachfolgende Komponente im Bereich von 150 bis 310 ms, deren Ausprägung eine zentrale Positivität mit einer occipitalen Negativität ist (C215). Welche Rolle die späten Komponenten C704 und C865 hinsichtlich des Geruchseinflusses wirklich spielen, ist wegen der Wechselwirkung mit dem Faktor „Stimulustyp“ nicht abschließend zu beantworten (siehe auch „Effekt des „Stimulustypen“ auf S. 91).

Insgesamt erscheint vor allem der „neue“ Geruch in der Bedingung „inkongruent“ besondere Veränderungen nach sich zu ziehen, so wie dies Morrin und Rathneshwar (2003) auf der Verhaltensebene schon diskutieren. Sie erwägen zwar die Möglichkeit, dies habe mit Erhöhter physiologischer Erregung zu tun, halten es anhand ihrer Daten jedoch für unwahrscheinlich. Dies widerspricht allerdings anderen Autoren, welche zeigen, dass Gerüche eben doch die allgemeine physiologische und vor allem vegetative Reagibilität beeinflussen (Heuberger, Hongratanaworakit und Buchbauer, 2006; Bensafi, 2002). Eine Beeinflussung des neuronalen Grundtonus hat schließlich grundsätzlich auch Auswirkungen auf evozierte Potentiale (Joost, Bach und Schulte-Mönting, 1992).

Im vorliegenden Fall ist es nicht klar, ob nun die besonderen Eigenschaften der Geruchs „Fichte“ oder der Wechsel des Geruches den besonderen Einfluss bedingen. Beide Situationen jedoch sind hypothetisch mit gesteigerter Erregung vergesellschaftet. Erstens birgt alleine der Wechsel vom „alten“ zum „neuen“ Geruch die Möglichkeit, dass hierdurch aufgrund eines „Neuheitseffektes“ ebenfalls die Erregung des Organismus gesteigert wird. Dieser allein hat schon Auswirkungen auf elektrophysiologische Parameter (Linden, 2005).

Zweitens könnte der Fichtengeruch subjektiv als anregender empfunden werden, als Zitrone, und dadurch die Erregung erhöhen (Bensafi, 2002). Doch die hedonische Bewertung des Geruches sollte in diesem Experiment keine Rolle spielen, weil der Fichtengeruch in seiner Bewertung lediglich etwa zwischen Raumluft und Zitrone eingeordnet wird. Auch eine trigeminale Komponente wäre denkbar (Michael, 2003). Diese beiden Faktoren wurden allerdings nicht abschließend in den Fragebögen erfasst, weswegen hierzu keine endgültige Aussage getroffen werden kann.

Die Versuchspersonen zeigen kürzere Latenzen in den ersten beiden Komponenten. Dies weist zwar nicht direkt auf erhöhte Erregung hin, aber auf nachvollziehbar schnellere Informationsverarbeitung, was wiederum in gewisser Weise in das „arousal“-Konzept passen würde. Allerdings sind dessen Auswirkungen vornehmlich für die Amplituden und nicht für Latenzen beschrieben (Joost, Bach und Schulte-Mönting, 1992).

Drittens ergibt sich ein gänzlich anderer Aspekt bei der Überlegung, ob nicht eben Fichtennadelöl aus der Gasphase auf den Organismus übertritt und sozusagen im größeren Maßstab [ungeplante] neuropharmakologische Effekte zur Folge hatte. Von der Hand zu weisen ist dies nicht. Schließlich werden Nadelholzextrakte als symptomatische Therapie für Demenz diskutiert. Pipingas et al. (2008) untersuchten

diesen Sachverhalt in einer klinischen Studie und Fedotova et al. (2012) prüften eine entsprechende Substanz im Tierversuch. Ob ein solcher Effekt in der vorliegenden Arbeit einen tatsächlichen Einfluss hatte, ist aktuell nicht nachzuvollziehen.

Gerüche scheinen also, so wie schon Iijima et al. (1998) anmerkten, die Zuteilung von Ressourcen in Prozessen der Informationsverarbeitung zu verbessern. Dies ist vor allem an den kürzeren Latenzen zu sehen. Welche Rolle hierbei genau der Geruchswechsel oder das Fichtennadelöl spielen, ist noch offen und sollte Gegenstand weiterer Forschungen sein.

Effekt des „Stimulustypen“

In mehreren Fällen ergibt sich ein signifikanter Effekt des Faktors „Stimulustyp“ alleine (C704, pos. Centroid Y, neg. Centroid Y; C865, GFP), oder in Interaktion mit dem Faktor „Geruchsbedingung“ (s. u.) auf bestimmte Parameter. Dies ist vollkommen unerwartet, was sich wie folgt erklärt: Vor dem Lernen, d.h. zum Zeitpunkt „vorher“, dürften sich die gegeneinander kontrollierten Test- und Kontrollreize hinsichtlich der durch sie evozierten Potentiale nicht unterscheiden. Erst „nachher“ sollten sich die Eigenschaften der beiden Stimulustypen unterscheiden, weil die Teilnehmer zwischen den Messungen ausschließlich die Testreize von ihrer Bedeutung her erlernen sollten. Ein alleiniger Einfluss des Faktors „Stimulustyp“ ohne eine Interaktion mit dem Faktor „Zeit“ bedeutet daher, dass eine nicht kontrollierte Störwirkung zu einem grundsätzlichen Unterschied zwischen den Test- und Kontrollreizen geführt hat.

Interessanterweise interagiert in drei Fällen (C215, pos. Centroid Y; C704, Latenz; C865, Latenz) der Faktor „Geruchsbedingung“ mit dem Faktor „Stimulustyp“, was am ehesten einen Einfluss des Umgebungsgeruches bzw. der Kongruenz oder Inkongruenz auf diesen nicht genau fassbaren „Stimulustyp“-Effekt zuzuschreiben ist.

Diese Störwirkung erscheint nach erneuter Durchsicht der Daten nicht nur auf einzelnen Versuchspersonen mit Extremwerten zu basieren, sondern einer gewissen Systematik zu folgen. Am ehesten könnte es sein, dass die sorgfältig kontrollierten Test- und Kontrollreize dennoch Unterschiede hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften aufweisen. Für einfache visuelle Reize sind beispielsweise deutliche Effekte unterschiedlicher Musteranordnungen bei gleicher Luminanz bekannt (Bodis-Wollner, 1986). Ferner besteht noch die Möglichkeit, dass die durch die „Denkaufgabe“ kognitive Prozesse ausgelöst wurden, die auch entsprechende Veränderungen verursacht haben. Dies ist jedoch unwahrscheinlich, weil nur drei von vierzig Kontrollreizen hierfür benutzt wurden und daher das Signal dieser ERPs erheblich zu

schwach wäre, um konstante Veränderungen zu bedingen. Abschließend klären lässt sich der tatsächliche Grund für diese Abweichungen im Nachhinein leider nicht mehr. Es bleibt kaum etwas anderes übrig, als die betreffenden Werte von der Ableitung von Ergebnisaussagen auszuschließen.

Schlussfolgerung

Obwohl in dieser Arbeit kein Phänomen nachvollzogen werden konnte, was man als kontextabhängiges Gedächtnis auf der Verhaltensebene bezeichnen könnte, so fanden sich jedoch etliche elektrophysiologische Besonderheiten, die durch Lernen, die Geruchsbedingung oder eine Interaktion dieser beiden Faktoren hervorgerufen wurden.

Zum einen lassen sich anhand hier erbrachten Ergebnisse die Berichte anderer Autoren bestätigen, dass Gerüche insgesamt einen modulierenden Einfluss auf visuell evozierte Hirnaktivität ausüben. Es konnte gezeigt werden, dass in einem Zeitbereich von 90 bis 310 ms die Verarbeitungsschritte der betroffenen Komponenten beschleunigt werden. Zudem wird die neuronale Aktivierungsstärke beeinflusst. Ein Geruchswechsel oder die speziellen Eigenschaften des Fichtengeruches zeigten besondere Einflussmuster. Für die weitere Forschung ergibt sich hieraus die neue Fragestellung, ob nun der Geruchswechsel oder eben Besonderheiten des Fichtengeruches zu den beobachteten Ergebnissen geführt haben. Falls letzteres zutrifft, ist zu klären, worin diese bestehen und ob dies möglicherweise auf andere Nadelhölzer übertragbar ist. In diesem Sinne wäre auch zu prüfen, ob sogar eine Art pharmakologischer Effekt vorliegt, wie er bereits von anderen proklamiert wird. Zudem erscheint es auch langfristig sinnvoll, in diesem Rahmen die physiologischen Ursachen für dieses Phänomen tiefer zu ergründen.

Zum anderen verändern sich die evozierten Potentiale, wenn die Versuchspersonen die Bedeutung der japanischen Symbole erlernen. Am deutlichsten wird dies durch einen recht spät auftretenden hemisphärischen Effekt um etwa 704 ms, der für einen zunehmenden linksseitigen Einfluss nach dem Lernen spricht. Es ist wahrscheinlich, dass es sich um das Ergebnis stattfindender sprachlicher Verarbeitung handelt. Für Folgeexperimente bietet sich an, den vorhandenen Aufbau derartig abzuändern, dass sehr unterschiedliche affektive Kanji-Bedeutungen benutzt werden, um auf diese Art den Zeitpunkt der ersten semantischen Verarbeitung verlässlich nachzuweisen.

Es konnte also nachvollziehbar dargelegt werden, dass auch ohne das Vorhandensein verhaltenspsychologischer Effekten Veränderungen evozierter Hirnaktivität durch Gerüche auftreten können.

Zusammenfassung

Einleitung: Wir wissen aus wissenschaftlichen Arbeiten, dass Gerüche nicht nur unser Verhalten verändern, sondern auch die elektrische Hirnaktivität beeinflussen können. Des Weiteren haben Wissenschaftler in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts versucht zu zeigen, dass Gerüche eine wichtige Rolle bei Gedächtnisprozessen spielen. Ein Aspekt hiervon ist, dass Duftstoffe die Fähigkeit besitzen, als Kontextfaktoren zu agieren, die zusammen mit Gedächtnisengrammen abgespeichert werden. Später wird dann das Erinnern an diese Information einfacher, wenn der ursprüngliche Kontext wiederhergestellt wird.

Fragestellung: Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die elektrophysiologischen Effekte von Gerüchen auf visuell evozierte Potentiale und ihre Topographie in einem Lernexperiment zu zeigen. Zusätzlich wurde sie dazu aufgebaut, diese Gerüche auf ihre Fähigkeit zu testen, im Sinne der Theorie von kontextabhängigem Gedächtnis als Kontextfaktor zu dienen.

Methoden: Allgemein war das Experiment in zwei Phasen eingeteilt. Phase 1 auf der einen Seite beinhaltet die Messung vor dem Lernen („vorher“) und das eigentliche Lernen. Phase 2 auf der anderen Seite bezieht sich auf den Zeitabschnitt, in dem sowohl die zweite Messung („nachher“), als auch das Testen stattfanden. Zu bestimmten Zeitpunkten wurde eine festgelegte Menge Duftöl mittels eines Ventilators passiv verdunstet. Teilnehmende Versuchspersonen wurden pseudo-zufällig und einseitig verblindet in drei Gruppen eingeteilt, von denen jede eine andere Geruchsbedingung darstellt. Die Gruppe „geruchlos“ roch in beiden Phasen des Experimentes lediglich die unveränderte Raumluft des Labors. Teilnehmer in der „kongruenten“ Geruchsbedingung wurden in beiden Phasen Zitronengeruch ausgesetzt. Eine dritte Gruppe, die Geruchsbedingung „inkongruent“, erhielt Zitronengeruch in Phase 1 und Fichtennadelgeruch in Phase 2.

Man benutzte eine hauseigene Elektrodenhaube mit 30 äquidistant verteilten Elektroden. Die visuellen Stimuli waren japanische Kanji-Zeichen, die zum Teil aus einer früheren Studie des gleichen Labors stammten. Die deutsche Bedeutung dieser vierzig schwarz-weißen Symbole sollte zwischen den beiden Messzeitpunkten binnen

zwanzig Minuten auswendig gelernt werden. Ganz am Ende des Versuches wurde dann mit einer unkommentierten Liste dieser Symbole geprüft, an welche Bedeutung sich die Versuchspersonen noch erinnern konnten. All diese erwähnten Test-Reize und die gleiche Anzahl als Kontrolle benutzter, nicht gelernter Zeichen, wurden in zufälliger Reihenfolge jeweils fünfzehnmal im zentralen Gesichtsfeld dargeboten. Am Ende enthielt jeder Datensatz „vorher“ und „nachher“ eine Gesamtzahl von 600 Rohdaten-Segmenten für die Post-Hoc-Mittelung. Der Interstimulus-Intervall betrug null Millisekunden, die Stimulusanzeigzeit 1000 ms. Eine Bandpass-Filterung wurde zwischen 0,53 und 30 Hz vorgenommen und artefaktbeladene Segmente verworfen. Am elektrophysiologischen Versuchsteil nahmen insgesamt 41 gesunde, junge Probanden teil, die größtenteils Studenten der hiesigen Universität waren.

Ergebnisse: Auf der Verhaltensebene konnte nach 20 Minuten lernen jede der Versuchspersonen im Mittel 35,76 (SD=5,96) Symbole richtig bezeichnen. Die Geruchsbedingung hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen. Es fand sich sogar eine leicht gegenteilige Tendenz, welche für geringfügig bessere Leistungen in der Geruchsbedingung „inkongruent“ (Zitrone – Fichte) spricht.

Was die Elektrophysiologie betrifft, konnten mehrere auffällige statistisch signifikante Effekte verzeichnet werden. Mittels der Global Field Power konnten fünf Komponenten der evozierten elektrischen Hirnaktivität zur weiteren Analyse definiert werden. Deren mittlere Latenzen waren 117, 215, 407, 704 und 865 ms nach Beginn der Reizdarbietung. Die weitere Analyse konzentrierte sich auf die Latenz und Amplitude des korrespondierenden lokalen Maximums der Global Field Power und die Position des negativen und positiven Centroiden zu diesem Zeitpunkt. Erstens führten die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Schachbrettmuster-Umkehr und der Kanji-Symbole zu deutlichen Unterschieden in Latenz, Global Field Power-Amplitude und Topographie der P100-artigen Aktivität. Wenn sie von Kanji-Reizen hervorgerufen wird erscheint die die okzipitale Positivität etwas weiter rechts und anterior, 10 ms später und mit kleinerer Feldstärke. Zweitens hatte Lernen einen kleineren Einfluss als dies vorher vermuteten worden war. Die Varianzanalyse (ANOVA) legte einen deutlichen topographischen Effekt bei einer mittleren Latenz von 704 ms offen. Die Position des negativen Centroiden, sowohl für gelernte als auch ungelernete Reize, befindet sich mehr rechtshemisphärisch. Für gelernte Stimuli jedoch erscheint er deutlich näher zur Mittellinie, was für hemisphärische Asymmetrien hinweisen ist. Ein anderer Lerneffekt taucht bei 117 ms auf, beeinflusst die GFP dieser Komponente und wird seinerseits durch die Geruchsbedingung moduliert. Drittens

beeinflusst die Geruchsbedingung die Latenz und GFP der P100-artigen Komponente und die Latenz der Komponente bei 215 ms. Bei letzterer erschien die Latenz in den beiden Geruchsbedingungen „kongruent“ und „inkongruent“ signifikant niedriger als in der „geruchlos“-Bedingung. Dies ist als Hinweis auf schnellere Informationsverarbeitung unter Geruchseinfluss zu werten. Außerdem zeigte die Latenz bei 117 ms ähnliche Ergebnisse, betonte aber die Rolle des Wechsels von Zitrone zu Fichte („inkongruent“). Viertens veränderte der Faktor „Zeitpunkt“ (der Messung) die Topographie dieser Komponenten C117 und C215, was als Resultat der verstrichenen Zeit oder wiederholter Reizdarbietung interpretiert werden kann. In der Arbeit werden mögliche Gründe diskutiert. Hierunter fallen Ermüdung, Adaptation oder Habituation und Wahrnehmungslernen.

Zusammenfassend zeigt diese Studie deutlich, wie Komponenten visuell evozierter Potentiale von Geruchs- und Lerneffekten und deren Interaktionen verändert werden können. Interessanterweise führt der Geruch von Fichtennadelöl oder der Wechsel des Geruches selbst zu schnellerer Informationsverarbeitung. Auch werden einige Effekte des Lernens aufgezeigt, worunter auch eine hemisphärische Asymmetrie fällt, die als Zeichen von Sprachverarbeitung gewertet werden kann.

Abstract (English)

Introduction: A general observation is that odors are thought to have lost most of their biological influence. However, research states that odors do not only alter behavior but also influence electrical brain activity. Furthermore, the most recent body of research successfully demonstrates that odors play an important role in memory as well. One aspect is that fragrances and scents have the ability to act as contextual factors which are encoded along with memory traces. Later, recalling the stored information will be easier when the original context is reinstated.

This study intended to show electrophysiological effects of odors on visually evoked potentials and their topography within a learning task. In addition, it was designed to test the ability of odors to serve as contextual information in the sense of environmental context-dependent memory or environmental reinstatement.

Methods: The experiment included two consecutive phases. Phase 1 included a recording session prior to learning and the vocabulary learning itself. Phase 2 covered the period in which both the second recording session and the memory test took place. Odor administration was carried out by diluting a fixed amount of aroma oil at specific moments in time using a fan. Sampling of the participants was undertaken in a single-blinded, pseudo-randomized selection into three groups, each representing a different odor condition. The “no odor” group was not exposed to any special scent aside from the existing “neutral” scent of the test laboratory during both phases of the study. Participants in the “congruent” condition experienced the odor of lemon in both phases. A third group, called “incongruent”, was administered the scent of lemon in phase 1 and in phase 2 spruce needle oil.

This research used a lab-specific electrode array with a flexible head cap and 30 equidistant electrodes. The stimuli utilized were Japanese kanji characters which in part had already been used in a former study of the workgroup. The German meaning of those 40 black and white symbols had to be learned within 20 minutes in between the two recording sessions. Each of those test stimuli and an equal number of other, unknown control stimuli were presented in random order in the central visual field 15 times per recording session. In concluding the recording, every dataset “prior” and “post” learning yielded a total of 600 raw segments for offline averaging. The interstimulus interval was zero milliseconds, the stimulus presentation time 1000 milliseconds. The data were filtered between 0.53 and 30 Hertz and segments contaminated with artifacts were removed. A total of 81 healthy subjects mostly

students of the local university took part in the learning experiment. For electrophysiology, 41 of them participated.

Results: On the level of behavior on the one hand, the odor condition had no significant effect on the subjects' performance in the cued recall task. On the contrary, there was an insignificant tendency in favor of the incongruent odor condition (lemon – spruce).

On the other hand, several distinct statistically significant effects could be identified for the study's application of electrophysiology. By the use of Global Field Power, components of event related electrical brain activity were defined. In sum, this study further investigated five components with mean latencies of 117, 215, 407, 704 and 865 ms after stimulus onset. The analysis was focused on the latency and amplitude of corresponding peaks in Global Field Power and the position of the negative and positive Centroids at that point in time. First, the different physical stimulus characteristics of checker board reversals and Kanji stimuli resulted in a conspicuous difference in latency, global field power amplitude, and topography of the P100-like response. The occipital positivity elicited by Kanji occurred somewhat more to the right and anterior, peaked 10 ms later and demonstrated smaller power than the checker board evoked activity. Second, learning had lesser influence than we had expected. An analysis of variance (ANOVA) revealed one distinct topographic effect for the component at a mean latency of 704 ms. The position of the negative centroid for both learned and unlearned stimuli can be found more on the right hemisphere whereas reactions to learned stimuli appear distinctly nearer to the midline. Another learning effect occurring at 117 ms and influencing the GFP of that component was also affected by the odor condition. Third, odor conditions influenced the latency and GFP-amplitude of the P100-like component and the latency of the component at 215ms. At 215ms, the latency in the "incongruent" and "congruent" conditions was significantly lower than in the "no odor" condition suggesting faster information processing under the influence of odors. In addition to that, the latency at 117ms showed similar results but emphasizing the role of the change from lemon to spruce ("incongruent"). Fourth, the factor "recording session" altered the topography of the earlier two components which can be interpreted as a result of time or repetitive stimulation. We discuss possible explanations, including fatigue, adaptation or habituation and perceptual learning.

To sum up, this study shows how components of VEPs are altered by odor and learning effects and their interactions at different component latencies. Additional findings are that the scent of spruce needle oil or the change of odor itself leads to

faster information processing. Some effects of learning can be seen, including a hemispheric effect which can be interpreted as a sign of linguistic processing.

Short abstract for databases (English)

This study intended to show electrophysiological effects of odors on visually evoked potentials and their topography within a learning task. In addition, it was designed to test the ability of odors to serve as contextual information in the sense of environmental context-dependent memory or environmental reinstatement.

The experiment included two phases. Phase 1 included a recording session prior to learning and the vocabulary learning itself. Phase 2 covered the period in which both the second recording session and the memory test took place. The odor conditions were “no odor” (plain air – plain air), “congruent” (lemon – lemon) and “incongruent” (lemon – spruce). The German meaning of those 40 black and white symbols had to be learned within 20 minutes in between the two recording sessions. A lab specific array with 30 electrodes was used for the 41 participants. The interstimulus interval was zero milliseconds, the stimulus presentation time 1000 milliseconds.

There was no significant effect of “odor condition” on behavioral performance and hence no context-dependent memory effect. By the use of Global Field Power, five components of event related electrical brain activity with mean latencies of 117, 215, 407, 704 and 865 ms after stimulus onset were defined. The analysis was focused on the latency, GFP-amplitude and the location of Centroids. A P100-like component with distinct differences to checkerboard VEP-P100 is described. The ANOVA revealed effects of time, learning and odour condition and complex interactions. Especially the latency of the early components at 117 and 215 ms was shorter when the environmental scent was changed from lemon to spruce (“incongruent”) suggesting expedited information processing. Learning effects could clearly be seen in an early (117 ms) and a late component (704 ms) the latter showing a hemispheric effect. Furthermore, a kind of habituation caused topographic alterations in the two earlier components as a result of time or repetitive stimulation. To sum up, this study clearly shows how components of VEPs can be altered by odour and learning effects and their interactions.

Keywords: Odor; odour; visually evoked potentials; VEP; ERP; kanji; Japanese; meaning; learning; context-dependent memory; state-dependent learning; environmental reinstatement

Abkürzungsverzeichnis

VEP	Visuell evoziertes Potential; ~s: plural
ERP	Event related potential (ereignis-korreliertes Potential)
VP	Versuchsperson(en)
CDM	Context-dependent memory (kontextabhängiges Gedächtnis/Lernen)
GFP	Global Field Power(-Amplitude) (globale Feldstärke)
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
EEG	Elektroencephalogramm
GA	Grand Average (Mittelwert über einige oder alle Versuchspersonen)
μV	Mikrovolt (10^{-6} Volt)
ms	Millisekunde (10^{-3} Sekunden)
n. s.	nicht signifikant (meist $p > 0,05$)
SNR	Signal-to-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)

Darstellungs-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 1 – Skizze zur Verdeutlichung des Konzeptes von kontextabhängigem Lernen.....	3
Abbildung 2 – Schema zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen topographischen Veränderungen und Messwerten an Einzelelektroden.....	18
Abbildung 3 – Skizze der Abläufe von Vor- und Hauptversuch.....	30
Abbildung 4 - Skizze des „Lüfters“, eines Gerätes, welches auf einer DIN-A-4-ähnlichen Fläche aufgebracht Düftöl in der Raumluft verteilt.	32
Abbildung 5 – Beispiele für Kanji-Symbole, jeweils eines pro Kategorie.	33
Abbildung 6 – Ein Schema über die Versuchspersonenkollektive.	35
Abbildung 7 – Schematische Darstellung der „Denkaufgabe“.....	42
Abbildung 8 – Schematische Darstellung der Positionen der Elektroden.	46
Abbildung 9 – Mittlere Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson für jede Versuchsbedingung.....	52

Abbildung 10 – Diagramm mit den Mittelwerten richtiger Antworten aller Versuchspersonen aus dem Gesamtkollektiv (n=81).....	55
Abbildung 11 – Global Field Power im Zeitverlauf bei Versuchsperson VP-E-35, vorher, Testreize (d.h. passend zu Abbildung 12).	57
Abbildung 12 – Potentialkarten einer ausgewählten, beispielhaften Versuchsperson. 59	
Abbildung 13 – Beispielhafte Darstellung der Global Field Power im Zeitverlauf mit ausgewählten Potentialkarten	60
Abbildung 14 – Potentialkarten der zusammengefassten Daten aller eingeschlossenen Versuchspersonen (sog. Grand Average; nicht gewichtet oder normalisiert)	62
Abbildung 15 – Position der positiven Centroiden zum Zeitpunkt des höchsten GFP-Gipfels im Zeitfenster zwischen 90 und 149 ms.....	63
Abbildung 16 - Darstellung der Interaktion der Faktoren „Geruchsbedingung“ x „Zeitpunkt“ für die Latenz der Komponente C117	64
Abbildung 17 a, b und c – 3-Faktoren-Interaktion „Stimulustyp x Zeitpunkt x Geruchsbedingung“	66
Abbildung 18 – C117, positiver Centroid, x-Achse (links-rechts) und y-Achse (posterior-anterior) im Vergleich vorher und nachher.....	67
Abbildung 19 – Für den negativen Centroiden herrschen ebenfalls topographische Effekte in der Varianzanalyse	67
Abbildung 20 – Darstellung des Einflussfaktors „Geruchsbedingung“ auf die Latenz der Komponente C215 (150-308 ms).	68
Abbildung 21 - Komponente C 215: Interaktion von Geruchsbedingung und Stimulustyp für den positiven Centroiden, y-Achse	68
Abbildung 22 – Komponente C704: Darstellung der Interaktion "Geruchsbedingung" x "Stimulustyp"	70
Abbildung 23 - C704, Interaktion Stimulustyp x Zeitpunkt.....	71
Abbildung 24 - Interaktion Stimulustyp x Zeitpunkt, C704, neg. Centroid	72
Abbildung 25 – Komponente C865: Interaktion der Faktoren „Geruchsbedingung“ x „Stimulustyp“	73
Abbildung 26 – C117: Posterior-Anterior-Achse, pos. Centroid, Kontrollreize.....	116
Abbildung 27 – C117: Negativer Centroid, Kontrollreize, Vergleich vorher-nachher, p-Werte gepaarter t-Tests. x-Achse (links-rechts).....	117
Abbildung 28 – C117: p-Werte entlang der Linie geben die Signifikanz im Vergleich vorher zu nachher an.	118
Abbildung 29 – C117: Negativer Centroid, Kontrollreize, Vergleich vorher-nachher, p-Werte gepaarter t-Tests. Die Abbildung zeigt die Y-Achse (hinten-vorne).	118

Abbildung 30 - Position des positiven Centroiden der Komponente C215 auf der x-Achse (links-rechts) für Kontrollreize.	119
Abbildung 31 – Mittlere Global Field Power der Maxima für Kontrollreize im Zeitfenster der Komponente C 407.	119
Abbildung 32 – Latenz der GFP-Maxima für Kontrollreize im Bereich der Komponenten C 407.	120
Abbildung 33 – C407: Mittlere Position des positiven Centroiden zum Zeitpunkt des jeweiligen GFP-Maximums auf der x-Achse für die Bedingung „inkongruent“	120
Abbildung 34 - Global Field Power für alle Bedingungen, Zeitpunkte und Stimulustypen im Zeitfenster der Komponente C704.	121
Abbildung 35 - Vergleich von Test- und Kontrollreizen hinsichtlich ihrer Latenz zum Zeitpunkt des GFP-Gipfels im Zeitfenster der C704-Komponente	121
Abbildung 36 – Vergleich von Test- und Kontrollreizen hinsichtlich ihrer Global Field Power im Zeitfenster der C704-Komponente.....	122
Abbildung 37 – Latenz der C865 für Test- und Kontrollreize, vorher und nachher, in verschiedenen Geruchsbedingungen.	122

Tabellen

Tabelle 1 – Übersicht über die Varianzanalysen.....	73
Tabelle 2 - p-Werte der Vergleiche zwischen den Ergebnissen in den Kanji-Kategorien Zahl (A), Eigenschaft (B), Leben (C) und Natur (D)	114
Tabelle 3 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Vorversuch (n=31).	114
Tabelle 4 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Hauptversuch (n=50).	115
Tabelle 5 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Gesamtkollektiv (n=81).	115
Tabelle 6 – P100-artiges C117: Maßzahlen zum Vergleich des „P100“ durch Schachbrettmuster-Reize und der ähnlichen Komponente C117.....	117
Tabelle 7 - Übersichtstabelle über die Ergebnisse der t-Tests.....	123

Literaturverzeichnis

- Áfra J, Cecchini AP, Pasqua V De, Albert A, Schoenen J (1998): Visual evoked potentials during long periods of pattern-reversal stimulation in migraine. *Brain* 121 (2): S. 233–241. DOI: 10.1093/brain/121.2.233.
- Aggleton JP, Waskett L (1999): The ability of odours to serve as state-dependent cues for real-world memories: can Viking smells aid the recall of Viking experiences? *British Journal of Psychology* 90 (Pt 1): S. 1–7.
- Aminoff MJ, Goodin DS (1994): Visual evoked potentials. [Review]. *Journal of Clinical Neurophysiology* 11 (5): S. 493–499.
- Avitabile T, Longo A, Caruso S, Gagliano C et mult. al. (2007): Changes in visual evoked potentials during the menstrual cycle in young women. *Current Eye Research* 32: S. 999–1003.
- Bähr M; Frotscher M; Duus P (2009): Neurologisch-topische Diagnostik. Anatomie - Funktion - Klinik. 9. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Balass M, Nelson JR, Perfetti CA (2010): Word learning: An ERP investigation of word experience effects on recognition and word processing. *Contemporary Educational Psychology* 35 (2): S. 126–140.
- Barrett G, Blumhardt L, Halliday AM, Halliday E, Kriss A (1976): A paradox in the lateralisation of the visual evoked response. *Nature* 261 (5557): S. 253–255. DOI: 10.1038/261253a0.
- Bender R, Lange S, Ziegler A (2007): Multiples Testen. Artikel Nr. 12 der Statistik-Serie der DMW. *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 132 (S 01): S. e26. DOI: 10.1055/s-2007-959035.
- Bensafi M (2002): Autonomic nervous system responses to odours: the role of pleasantness and arousal. *Chemical Senses* 27 (8): S. 703–709. DOI: 10.1093/chemse/27.8.703.
- Bensafi M, Pierson A, Rouby C, Farget V, Bertrand B, Vigouroux M, Jouvent R, Holley A (2002): Modulation of visual event-related potentials by emotional olfactory stimuli. *Neurophysiologie clinique* 32: S. 335–342.
- Bhutta MF (2007): Sex and the nose: human pheromonal responses. *Journal of the Royal Society of Medicine* 100 (6): S. 268–274.

- Birbaumer N, Schmidt RF (2005a): Kognitive Funktionen und Denken. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 261–270.
- Birbaumer N, Schmidt RF (2005b): Lernen und Gedächtnis. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 224–239.
- Bodis-Wollner I (1986): The importance of stimulus selection in VEP practice: the clinical relevance of visual physiology. In: Cracco RQ. und Bodis-Wollner I (Hg.): Evoked potentials. New York: Liss: S. 15–27.
- BrainInfo (1991-heute). Datenbankzugang zu NeuroNames und NeuroMaps. Unter Mitarbeit von Douglas M. Bowden, Mark F. Dubach, Erik McArthur, Evan Song, Ioulia Kocheleva und Eider Moore. University of Washington, National Primate Research Center. Online verfügbar unter <http://www.braininfo.org>, zuletzt geprüft am 03.04.2013.
- Brandeis D, Michel CM, Amzica F (2009): From neuronal activity to scalp potential fields. In: Michel CM., Koenig T, Brandeis D, Gianotti LRR und Wackermann J (Hg.): Electrical Neuroimaging. Cambridge & New York: Cambridge University Press: S. 1–24.
- Bressler SL, Tognoli E (2006): Operational principles of neurocognitive networks. *International Journal of Psychophysiology* 60 (2): S. 139–148.
- Bustamante JA, et al (1970): State dependent learning in humans. *Physiology & Behavior* 5(7): S. 793–796.
- Caesar und Loretz GmbH (Hg.) (2009+2010): Sicherheits- und Produktdatenblätter zur Zitronenöl und Fichtennadelöl. Online verfügbar unter <http://www.caelo.de>, zuletzt geprüft am 01.04.2011.
- Cann A, Ross DA (1989): Olfactory stimuli as context cues in human memory. *The American Journal of Psychology* 102 (1): S. 91–102. DOI: 10.2307/1423118.
- Castle PC, van Toller S, Milligan GJ (2000): The effect of Odour Priming on cortical EEG and visual ERP responses. *International Journal of Psychophysiology* 36: S. 123–131.

- Cohen RA; Sparling-Cohen Y; O'Donnel B (1993): The neuropsychology of attention. New York [u.a.]: Plenum Press.
- Cop M; Dralle A; MacKenzie C; Proctor A; Cyffka A; Ender A (2003): PONS-Großwörterbuch für Experten und Universität. 1. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Klett.
- Debrulle JB (2007): The N400 potential could index a semantic inhibition. [Review]. *Brain Research Reviews* 56 (2): S. 472–477.
- Di Russo F, Pitzalis S, Spitoni G, Aprile T, Patria F, Spinelli D, Hillyard SA (2005): Identification of the neural sources of the pattern-reversal VEP. *NeuroImage* 24 (3): S. 874–886. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.09.029.
- Ducrot S, Grainger J (2007): Deployment of spatial attention to words in central and peripheral vision. *Perception & Psychophysics* 69 (4): S. 578–590.
- Dudel J, Heckmann M (2005): Erregungsleitung und synaptische Übertragung. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 85–115.
- Duncan CC, Barry RJ, Connolly JF, Fischer C, Michie PT, Näätänen R, Polich J, Reinvang I, van Petten C (2009): Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clinical Neurophysiology* 120 (11): S. 1883–1908. DOI: 10.1016/j.clinph.2009.07.045.
- Eich JE (1989): Theoretical issues in state-dependent memory. In: Roediger HL. (Hg.): Varieties of memory and consciousness. Essays in honour of Endel Tulving. Hillsdale, NJ: Erlbaum: S. 331–354.
- Eysel U, Grüsser-Cornehls U (2005): Sehen und Augenbewegungen. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 368–407.
- Fakler B, Fahlke C (2005): Grundlagen zellulärer Erregbarkeit. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 55–84.
- Fedotova J, Soultanov V, Nikitina T, Roschin V, Ordayn N (2012): Ropren® is a polyprenol preparation from coniferous plants that ameliorates cognitive

- deficiency in a rat model of beta-amyloid peptide-(25–35)-induced amnesia. *Phytomedicine* 19 (5): S. 451–456. DOI: 10.1016/j.phymed.2011.09.073.
- Firestein S (2001): How the olfactory system makes sense of scents. *Nature* 413: S. 211–218.
- Fugmann B; Lang-Fugmann S; Steglich W; Schick H; Adam G (1997): *Naturstoffe*. Stuttgart & New York: Thieme.
- Fu S, Fedota JR, Greenwood PM, Parasuraman R (2010): Dissociation of visual C1 and P1 components as a function of attentional load: An event-related potential study. *Biological Psychology* 85 (1): S. 171–178. DOI: 10.1016/j.biopsycho.2010.06.008.
- Fu S, Feng C, Guo S, Luo Y, Parasuraman R (2012): Neural adaptation provides evidence for categorical differences in processing of faces and Chinese characters: an ERP study of the N170. *PLoS ONE* 7 (7): S. e41103.
- Godden DR, Baddeley AD (1975): Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology* 66 (3): S. 325–331.
- Grigor J (1995): Do the eyes see what the nose knows? An investigation of the effects of olfactory priming on visual event related potentials. Summary. Beitrag in: Eleventh Congress of European Chemoreception Research Organisation (ECRO XI). *Chemical Senses* 20 (1): S. 163. DOI: 10.1093/chemse/20.1.77.
- Grigor J, Toller SV, Behan J, Richardson A (1999): The effect of odour priming on long latency visual evoked potentials of matching and mismatching objects. *Chemical Senses* 24: S. 137–144.
- Hartikainen KM, Knight RT (2003): Lateral and orbital prefrontal cortex contributions to attention. In: Polich J (Hg.): *Detection of change. Event-related potential and fMRI findings*. Boston: Kluwer Academic Publishers: S. 99ff.
- Hatt H (2005): Geschmack und Geruch. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): *Physiologie des Menschen*. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 409–422.

- Hayashi M, Kayamoto Y, Tanaka H, Yamada JUN (1998): Semantic activation by Japanese Kanji: evidence from event-related potentials. *Perceptual and Motor Skills* 86 (2): S. 375–382. DOI: 10.2466/pms.1998.86.2.375.
- Heinrich SP, Bach M (2001): Adaptation dynamics in pattern-reversal visual evoked potentials. *Documenta Ophthalmologica* 102 (2): S. 141–156. DOI: 10.1023/A:1017509717071.
- Heinze H, Mangun GR (1995): Electrophysiological signs of sustained and transient attention to spatial locations. *Neuropsychologia* 33 (7): S. 889–908. DOI: 10.1016/0028-3932(95)00023-V.
- Herz RS (1997): The effects of cue distinctiveness on odor-based context-dependent memory. *Memory & Cognition* 25 (3): S. 375–380.
- Heuberger E, Hongratanaworakit T, Buchbauer G (2006): East Indian Sandalwood and α -Santalol Odor Increase Physiological and Self-Rated Arousal in Humans. *Planta Medica* 72 (9): S. 792–800. DOI: 10.1055/s-2006-941544.
- Hiessl AK (2010): Bedeutung multisensorischer Reize - Bedeutungsdimensionen und elektrophysiologische Hirnaktivität. Inauguraldissertation. Justus-Liebig-Universität, Gießen. Physiologisches Institut. Online verfügbar unter <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2010/7926/>, zuletzt geprüft am 15.04.2010.
- Hiessl AK, Skrandies W (2013): Evaluation of multisensory stimuli—Dimensions of meaning and electrical brain activity. *Neuropsychologia* 51 (7): S. 1330–1335. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2013.03.030.
- Hillyard SA, Vogel EK, Luck SJ (1998): Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 353 (1373): S. 1257–1270. DOI: 10.1098/rstb.1998.0281.
- Hummel T, Gollisch R, Wildt G, Kobal G (1991): Changes in olfactory perception during the menstrual cycle. *Experientia* 47: S. 712–715.
- Hüttenbrink K, Hummel T, Berg D, Gasser T, Hähner A (2013): Olfactory dysfunction: common in later life and early warning of neurodegenerative disease. Riechstörungen: Häufig im Alter und wichtiges Frühsymptom neurodegenerativer Erkrankungen. *Deutsches Ärzteblatt International* 110 (1-2): S. 1–7.

- Iijima M, Osawa M, Kubota M, Sawada K, Komaki R, Iwata M (1998): Effects of perfume on cognitive function evaluated by event-related potentials. In: Koga Y, Nagata K und Hirata K (Hg.): Brain topography today. Proceedings of the III Pan-Pacific Conference on Brain Topography (BTOPPS III), Tokyo Bay, Japan, April 1-4, 1997. Amsterdam & New York: Elsevier: S. 744–749.
- Iijima M, Osawa M, Nishitani N, Iwata M (2009): Effects of incense on brain function: evaluation using electroencephalograms and event-related potentials. *Neuropsychology* 59: S. 80–86.
- Iwata M (1986): Neural mechanism of reading and writing in the Japanese language. *Functional Neurology* 1 (1): S. 43–52.
- Jasper HH (1958): The ten-twenty electrode system of the International Federation. (aus: Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography 1957). *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 10 (2): S. 371–375.
- Jellinek JS (1992): Perfume classification: a new approach. In: van Toller S und Dodd GH. (Hg.): Fragrance. The psychology and biology of perfume. London & New York: Elsevier: S. 229–242.
- Joanette Y, Goulet P, Le Dorze G (1988): Impaired word naming in right-brain-damaged right-handers: Error types and time-course analyses. *Brain and Language* 34 (1): S. 54–64. DOI: 10.1016/0093-934X(88)90124-1.
- Joost W, Bach M, Schulte-Mönting J (1992): Influence of mood on visually evoked potentials: a prospective longitudinal study. *International Journal of Psychophysiology* 12 (2): S. 147–153. DOI: 10.1016/0167-8760(92)90005-V.
- Kapadia RJ (2012): Digital filters. Theory, application and design of modern filters. Weinheim: Wiley-VCH.
- Key APF, Molfese DL, Ratajczak ED (2006): ERP Indicators of Learning in Adults. *Developmental Neuropsychology* 29 (2): S. 379–395. DOI: 10.1207/s15326942dn2902_5.
- Klein A (2013): Entfernung sonstiger Artefakte durch Transformation auf Normalverteilung und Subsampling. Gießen, 12.03.2013. Persönliche Email an Benjamin Wuerzer.

- Klein A, Skrandies W (2013): A reliable statistical method to detect eyeblink-artefacts from electroencephalogram data only. *Brain Topography* Online first 03/2013. DOI: 10.1007/s10548-013-0281-2.
- Kobal G, Hummel T (1991): Olfactory evoked potentials in humans. In: Getchell TV. (Hg.): Smell and taste in health and disease. New York: Raven Press: S. 255–275.
- Kutas M, Hillyard SA (1980): Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207 (4427): S. 203–205. DOI: 10.1126/science.7350657.
- Kutas M, van Petten C, Besson M (1988): Event-related potential asymmetries during the reading of sentences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 69 (3): S. 218–233. DOI: 10.1016/0013-4694(88)90131-9.
- Lang, Florian; Schmidt, Robert F. (Hg.) (2005): Physiologie des Menschen. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg.
- Lascano AM, Hummel T, Lacroix JS, Landis BN, Michel CM (2010): Spatio-temporal dynamics of olfactory processing in the human brain: an event-related source imaging study. *Neuroscience* 167: S. 700–708.
- Lehmann D (1986): Spatial Analysis of Human Evoked Potentials. In: Cracco RQ. und Bodis-Wollner I (Hg.): Evoked potentials. New York: Liss: S. 3–14.
- Lehmann D, Skrandies W (1980): Reference-free identification of components of checkerboard-evoked multichannel potential fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 48 (6): S. 609–621. DOI: 10.1016/0013-4694(80)90419-8.
- Lehmann D, Skrandies W (1984): Spatial analysis of evoked potentials in man—a review. *Progress in Neurobiology* 23 (3): S. 227–250. DOI: 10.1016/0301-0082(84)90003-0.
- Linden DE (2005): The P300: where in the brain is it produced and what does it tell us? [Review]. *Neuroscientist* 11 (6): S. 563–576.
- Lorig TS (1994): EEG and ERP studies of low-level odor exposure in normal subjects. *Toxicology and Industrial Health* 10 (4-5): S. 579–586.

- Lorig TS, Mayer TS, Moore FH, Warrenburg S (1993): Visual event-related potentials during odor labeling. *Chemical Senses* 18 (4): S. 379–387.
- Mangun GR (1995): Neural mechanisms of visual selective attention. *Psychophysiology* 32 (1): S. 4–18. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1995.tb03400.x.
- McDaniel MA, Anderson DC, Einstein GO, O'Halloran C (1989): Modulation of Environmental Reinstatement Effects through encoding strategies. *The American Journal of Psychology* 102 (4).
- Michael G (2003): Ambient odors modulate visual attentional capture. *Neuroscience Letters* (352): S. 221–225. DOI: 10.1016/S0304-3940(03)01078-4.
- Michel, Christoph M.; Koenig, Thomas; Brandeis, Daniel; Gianotti, Lorena RR; Wackermann, Jiri (Hg.) (2009): Electrical Neuroimaging. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA (1983): Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neurosciences* 6 (10): S. 414–417.
- Modrow HE, Petroff KSR, Bliss DK (1978): Physiological Substrates of State Dependent Learning. In: Colpaert FC. und Rosecrans JA. (Hg.): Stimulus Properties of Drugs: Ten Years of Progress. Amsterdam & New York: Elsevier/North-Holland Biomedical Press: S. 415–421.
- Morrin M, Rathneshwar S (2003): Does it make sense to use scents to enhance brand memory. *Journal of Marketing Research* 40 (1): S. 10–25.
- Näätänen R (1992): Attention and brain function. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Oldfield RC (1971): The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 9: S. 97–113.
- Paik S, Ringach DL (2011): Retinal origin of orientation maps in visual cortex. *Nature Neuroscience* 14 (7): S. 919–925. DOI: 10.1038/nn.2824.
- Perfetti CA, Wlotko EW, Hart LA (2005): Word learning and individual differences in word learning reflected in event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 31 (6): S. 1281–1292. DOI: 10.1037/0278-7393.31.6.1281.

- Picton TW (1992): The P300 wave of the human event-related potential. [Review] [205 refs]. *Journal of Clinical Neurophysiology* 9 (4): S. 456–479.
- Pipingas A, Silberstein RB, Vitetta L, van Rooy C, Harris EV, Young JM, Frampton CM, Sali A, Nastasi J (2008): Improved cognitive performance after dietary supplementation with a *Pinus radiata* bark extract Formulation. *Phytotherapy Research* 22 (9): S. 1168–1174. DOI: 10.1002/ptr.2388.
- Pointer SC, Bond NW (1998): Context-dependent memory: Colour versus odour. *Chemical Senses* 23 (3): S. 359–362. DOI: 10.1093/chemse/23.3.359.
- Preti G, Cutler WB, Garcia CR, Huggins GR, Lawley HJ (1986): Human axillary secretions influence women's menstrual cycles: The role of donor extract of females. *Hormones and Behavior* 20 (4): S. 474–482. DOI: 10.1016/0018-506X(86)90009-7.
- Price JL (1990): Olfaction. In: Paxinos G (Hg.): The human nervous system. San Diego [u.a.]: Academic Press: S. 1196–1211.
- Reik P, Skrandies W (2006): Die affektive Bewertung von imaginierten Gerüchen mit dem semantischen Differential. *Zeitschrift für Psychologie* 214 (2): S. 108–115.
- Sarfarazi M (1999): Visual event related potentials modulated by contextually relevant and irrelevant olfactory primes. *Chemical Senses* 24 (2): S. 145–154. DOI: 10.1093/chemse/24.2.145.
- Saunders KJ, Brown G, McCulloch DL (1998): Pattern-onset visual evoked potentials: more useful than reversal for patients with nystagmus. *Documenta Ophthalmologica* 94 (3): S. 265–274. DOI: 10.1007/BF02582984.
- Seo H, Arshamian A, Schemmer K, Scheer I, Sander T, Ritter G, Hummel T (2010): Cross-modal integration between odors and abstract symbols. *Neuroscience Letters* 478: S. 175–178.
- Shimoyama I, Morita Y, Uemura K, Kojima Y, et al (1992): Verbal versus non-verbal visual evoked potentials: Kanji versus line drawings. *Brain Topography* 5 (1): S. 35–39.
- Shinoda H, Skrandies W (2013): Topographic changes in event-related potentials because of learning of meaningful Kanji characters. *Neuroreport*. S. 1. DOI: 10.1097/WNR.0b013e3283623743.

- Silver WL, Finger TE (1991): The Trigeminal System. In: Getchell TV. (Hg.): Smell and taste in health and disease. New York: Raven Press: S. 97–108.
- Skrandies W (1987): The Upper and lower visual field of man. Electrophysiological and functional differences. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag (Progress in Sensory Physiology, 8). Online verfügbar unter http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2009/7087/pdf/Skrandies_UpperLower_1987.pdf.
- Skrandies W (1995): Visual information processing: Topography of brain electrical activity. *Biological Psychology* 40 (1-2): S. 1–15.
- Skrandies W (1998): Evoked potential correlates of semantic meaning-A brain mapping study. *Cognitive Brain Research* 6 (3): S. 173–183.
- Skrandies W (2005): Brain mapping of visual evoked activity - topographical and functional components. *Acta Neurologica Taiwanica* 14 (4): S. 164–178.
- Skrandies W (2006): Psychophysics and electrophysiology of human perceptual learning: a summary. In: Barber C, Tsuji S, Tobimatsu S, Uozumi T, Akamatsu N und Eisen A (Hg.): Functional Neuroscience: Evoked Potentials and Related Techniques. *Clinical Neurophysiology* 59 (Supplement): S. 81–87.
- Skrandies W, Chiu M (2003): Dimensions of affective semantic meaning — behavioral and evoked potential correlates in Chinese subjects. *Neuroscience Letters* 341 (1): S. 45–48. DOI: 10.1016/S0304-3940(03)00137-X.
- Skrandies W, Fahle M (1994): Neurophysiological correlates of perceptual learning in the human brain. *Brain Topography* 7 (2): S. 163–168.
- Skrandies W, Reik P, Kunze C (1999): Topography of evoked brain activity during mental arithmetic and language tasks - sex differences. *Neuropsychologia* 37: S. 421–430.
- Skrandies W, Shinoda H (2012): Topographical Changes of ERPs Related to Human Semantic Learning. *International Journal of Psychophysiology* 85 (3): S. 337. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2012.06.128.
- Smith SM (1986): Environmental context-dependent recognition memory using a short-term memory task for input. *Memory & Cognition* 14 (4): S. 347–354. DOI: 10.3758/BF03202513.

- Smith SM (1994): Theoretical principles of context-dependent memory. In: Morris PE und Gruneberg MM (Hg.): Theoretical aspects of memory. 2. Aufl. London & New York: Routledge: S. 168–195.
- Smith SM, Glenberg A, Bjork RA (1978): Environmental context and human memory. *Memory & Cognition* 6: S. 342–353.
- Smith SM, Vela E (2001): Environmental context-dependent memory: A review. *Psychonomic Bulletin & Review* 8 (2): S. 203–220.
- Sutton S, Ruchkin DS (1984): The Late Positive Complex. *Annals of the New York Academy of Sciences* 425 (1 Brain and Inf): S. 1–23. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1984.tb23520.x.
- Tan LH, Spinks JA, Gao JH, Liu HL, Perfetti CA, Xiong J, Stofer KA, Pu Y, Liu Y, Fox PT (2000): Brain activation in the processing of Chinese characters and words: A functional MRI study. *Human Brain Mapping* 10 (1): S. 16–27.
- Trepel M (2008): Neuroanatomie. Struktur und Funktion. 4. Aufl. München: Elsevier, Urban & Fischer.
- Tulving E, Thomson DM (1973): Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review* 80 (5): S. 352–373.
- Wei Jh, Peng DI, Le Yang Z, Chan Tc, Luo Yj (2001): The hemispheric difference of semantic processing of Chinese characters in two dimensions as revealed by ERPs. *Neuroreport* 12 (17): S. 3697–3701.
- Wikipedia (2013): Chypre. Lexikoneintrag. Hg. v. Wikimedia Foundation. Online verfügbar unter <http://en.wikipedia.org/wiki/Chypre>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2013, zuletzt geprüft am 03.06.2013.
- Woestenburg J, Verbaten M, Slangen J (1983): Stimulus information and habituation of the visual event related potential and the skin conductance reaction under task-relevance conditions. *Biological Psychology* 16 (3-4): S. 225–240. DOI: 10.1016/0301-0511(83)90026-1.
- Yen Na Yum (2011): Words and pictures: An electrophysiological investigation of domain specific processing in native Chinese and English speakers. *Neuropsychologia* 49: S. 1910–1922. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.03.018.

Zaidel E (1976): Auditory vocabulary of the right hemisphere following brain bisection or hemidecortication. *Cortex* 12 (3): S. 191–211. DOI: 10.1016/S0010-9452(76)80001-9.

Zimmermann M (2005): Das somatoviszzerale sensorische System. In: Lang F und Schmidt RF. (Hg.): *Physiologie des Menschen*. 29. Aufl. New York: Springer Medizin Verlag Heidelberg: S. 295–316.

Zouridakis G, Simos PG, Breier JI, Papanicolaou AC (1998): Functional hemispheric asymmetry assessment in a visual language task using MEG. *Brain Topography* 11 (1): S. 57–65. DOI: 10.1023/A:1022270620396.

Anhang

Zusätzliche Abbildungen und Tabellen

In diesem Abschnitt finden sich zusätzliche Abbildungen und Tabellen, die zum Teil redundant sind oder deren Aussagekraft nicht groß genug ist, um sie im Hauptteil der Arbeit abzubilden. Ferner werden hier auch Ergebnisse dargestellt, die rein der Illustration dienen und gegebenenfalls nicht statistisch signifikant sind.

Verhalten

Tabelle 2 - p-Werte der Vergleiche zwischen den Ergebnissen in den Kanji-Kategorien Zahl (A), Eigenschaft (B), Leben (C) und Natur (D) des Gesamtkollektivs (n=81). Gezählt wurde die Anzahl richtiger Antworten innerhalb einer Kategorie je Versuchsperson (Maximum 10). Nur ein Wert erreicht die Bonferroni-korrigierte Signifikanzschwelle von $p=0,0084$. Zweiseitige t-Tests für gepaarte Stichproben.

P-Werte (gepaart)	B	C	D
A	0,4703	0,0072	0,6079
B		0,0212	0,8660
C			0,0131

Tabelle 3 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Vorversuch (n=31). P-Werte gepaarter, zweiseitiger t-Tests.

<u>Vorversuch (n=31)</u>			
Richtige Antw.	geruchlos	kongruent	inkongruent
Mittelwert	35,40	36,80	35,91
SD	4,70	3,49	6,96
Anzahl	10	10	11

p-Werte	geruchlos	kongruent	inkongruent
geruchlos		0,46	0,85
kongruent			0,72

Tabelle 4 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Hauptversuch (n=50). P-Werte gepaarter, zweiseitiger t-Tests.

Hauptversuch Verhalten (n=50)			
Richtige Antw.	geruchlos	kongruent	inkongruent
Mittelwert	33,93	35,18	37,39
SD	8,46	6,92	3,13
Anzahl	15	17	18
p-Werte			
geruchlos		0,65	0,12
kongruent			0,23

Tabelle 5 - Anzahl richtiger Antworten je Versuchsperson in den jeweiligen Geruchsbedingungen im Gesamtkollektiv (n=81). P-Werte gepaarter, zweiseitiger t-Tests.

Gesamtkollektiv Verhalten (n=81)			
Richtige Antw.	geruchlos	kongruent	inkongruent
Mittelwert	34,52	35,78	36,83
SD	7,11	5,86	4,88
Anzahl	25	27	29
p-Werte			
geruchlos		0,49	0,17
kongruent			0,47

Elektrophysiologie

In diesem Abschnitt finden sich zusätzliche Abbildungen und Tabellen für den elektrophysiologischen Teil, die zum Teil redundant sind oder deren Aussagekraft nicht groß genug ist, um sie im Hauptteil der Arbeit abzubilden. Ferner werden hier auch Ergebnisse dargestellt, die rein der Illustration dienen und gegebenenfalls nicht statistisch signifikant sind.

C117

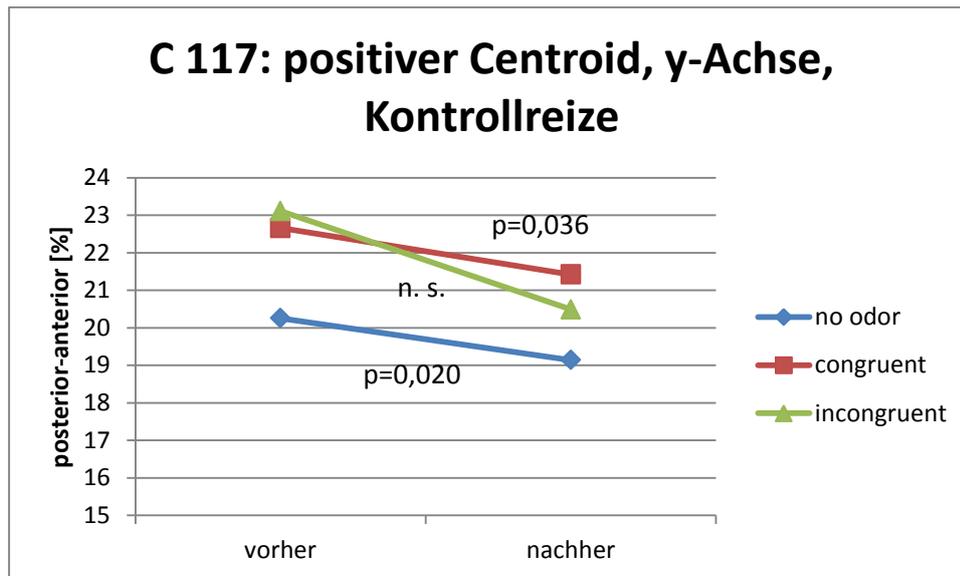


Abbildung 26 – Posterior-Anterior-Achse, pos. Centroid, Kontrollreize. Vergleich vorher und nachher, d.h. erste und zweite Messung. Für die Bedingungen „geruchlos“ und „kongruent“ sind die Positionen nachher im Vergleich zu vorher signifikant nach posterior verlagert. Man beachte, dass nur der Einfluss des Faktors „Zeitpunkt“ in der ANOVA signifikant wird. Die Darstellung der einzelnen Bedingungen dient in erster Linie der Orientierung.

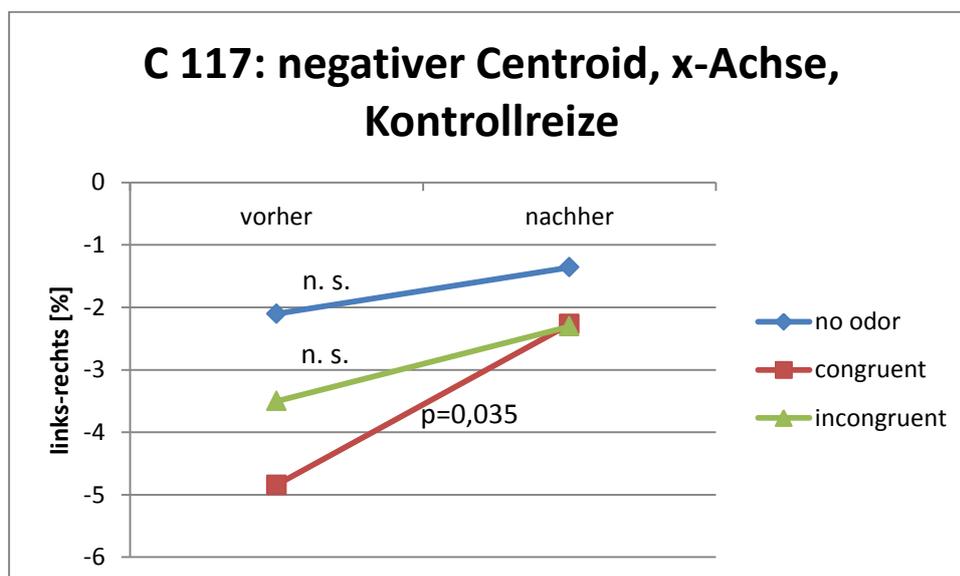


Abbildung 27 – Negativer Centroid, Kontrollreize, Vergleich vorher-nachher, p-Werte gepaarter t-Tests. x-Achse (links-rechts). In der Bedingung „geruchlos“ verlagert sich der Centroid nicht. Bei „kongruent“ verschiebt er sich nachher im Vergleich zu vorher sowohl deutlich nach anterior als auch nach rechts, d.h. zur Mittellinie hin. In der inkongruenten Geruchsbedingung („inkongruent“) ist lediglich eine signifikante Anterior-Bewegung zu erfassen. Es bleibt zu betonen, dass in der Varianzanalyse lediglich für den Faktor „Zeitpunkt“ ein signifikanter Einfluss gefunden werden konnte.

Tabelle 6 – P100-artiges C117: Maßzahlen zum Vergleich des „P100“ durch Schachbrettmuster-Reize und der ähnlichen Komponente durch japanische Kanji-Symbole. Die oberen beiden Tabellenanteile zeigen mittlere Latenzen, GFP und die Position des positiven Centroiden auf der x- und y-Achse an. Beide Achsen haben ihren Nullpunkt auf dem Inion und geben Rechtswärtigkeit, beziehungsweise Anteriorität an. Der untere Abschnitt zeigt die p-Werte der jeweiligen Merkmale beim Vergleich mit dem passenden Gegenstück der Schachbrettmusterreize im t-Test für abhängige Stichproben. Beide Achsen des negativen Centroiden erreichten nicht die Signifikanz $p=0,05$. Die nach Bonferroni angepasste Signifikanzschwelle für den Vergleich von sechs Parametern ist $p<0,0083$.

	Latenzen [ms]			Global Field Power [µV]		
	Schachbrett	Kanji vorher	Kanji gelernt	Schachbrett	Kanji vorher	Kanji gelernt
Mittelwert	107,07	117,05	118,49	3,24	2,10	2,07
Standardabw.	9,14	8,78	10,44	1,13	0,79	0,78

	positiver Centroid, X-Achse [%]			positiver Centroid, Y-Achse [%]		
	Schachbrett	Kanji vorher	Kanji gelernt	Schachbrett	Kanji vorher	Kanji gelernt
Mittelwert	1,55	6,23	4,79	18,74	22,40	21,69
Standardabw.	6,08	6,77	6,83	6,71	5,86	5,32

Vergleich zu Schachbrettmustern		
(p-Werte)	Kanji vorher	Kanji gelernt
pos. Centr. X	<0,001	0,032
pos. Centr. Y	0,008	0,028
Latenz	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶
GFP	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶

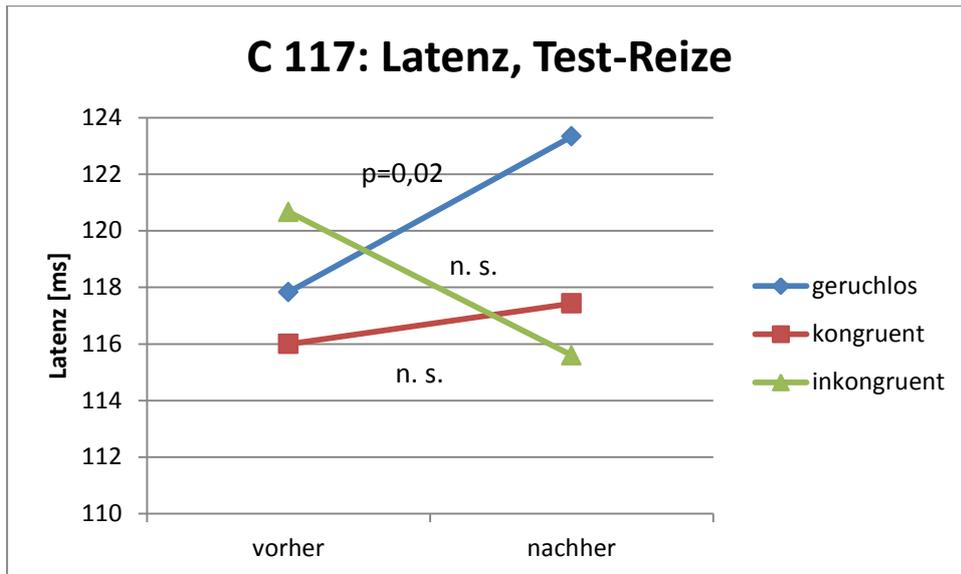


Abbildung 28 – p-Werte entlang der Linie geben die Signifikanz im Vergleich vorher zu nachher an. Zudem besteht ein signifikanter Unterschied zwischen dem Mittelwert der Kontroll- und Testreize zum Zeitpunkt „nachher“ in der Bedingung „geruchlos“ ($p=0,015$, gepaarter t-Test, zweiseitig)

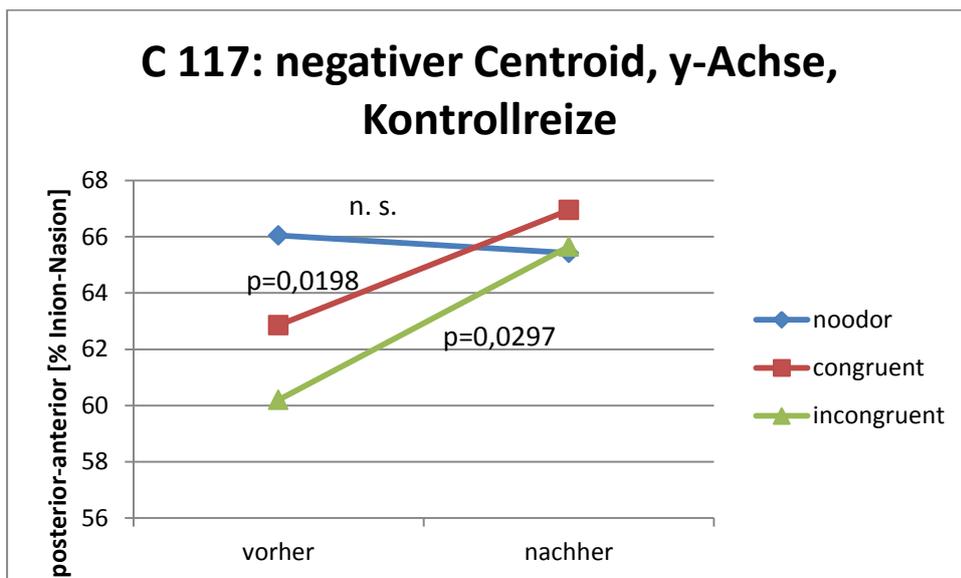


Abbildung 29 – Negativer Centroid, Kontrollreize, Vergleich vorher-nachher, p-Werte gepaarter t-Tests. Die Abbildung zeigt die Y-Achse (hinten-vorne). In der Bedingung „geruchlos“ verlagert sich der Centroid nicht. Bei „kongruent“ verschiebt er sich nachher im Vergleich zu vorher sowohl deutlich nach anterior als auch nach rechts (nicht dargestellt), d.h. zur Mittellinie hin. In der inkongruenten Geruchsbedingung („inkongruent“) ist lediglich eine signifikante Anterior-Bewegung zu erfassen. Es bleibt zu betonen, dass in der Varianzanalyse lediglich für den Faktor „Zeitpunkt“ ein signifikanter Einfluss gefunden werden konnte.

C215

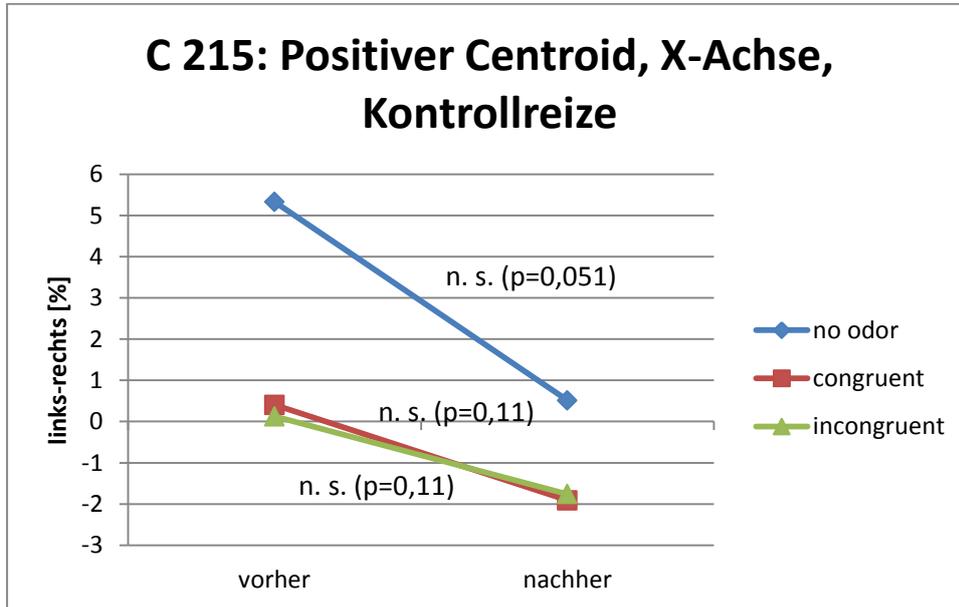


Abbildung 30 - Position des positiven Centroiden der Komponente C215 auf der x-Achse (links-rechts) für Kontrollreize. Es liegen hier Tendenzen einer Linksbewegung von vorher nach nachher vor, die besonders für die „geruchlos“-Bedingung vorherrschen. Man beachte, dass hier zwar nur die Daten der Kontrollreize dargestellt sind, wohl aber die ANOVA nur für den Faktor „Zeitpunkt“ und nicht für „Stimulustyp“ signifikant wird.

C407

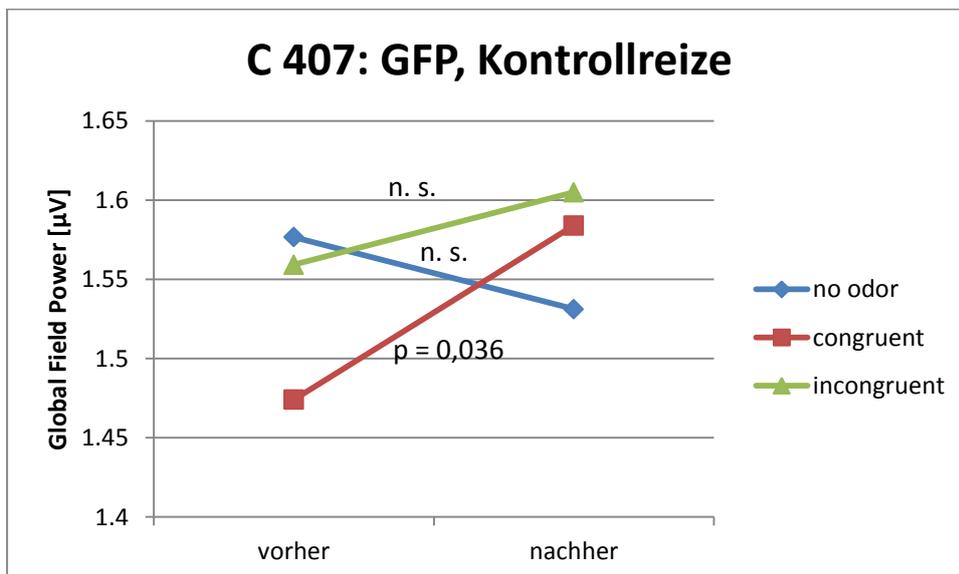


Abbildung 31 – Mittlere Global Field Power der Maxima für Kontrollreize im Zeitfenster der Komponente C 407. Es kommt in der Bedingung „kongruent“ zu einem signifikanten Anstieg der GFP im Vorher-Nachher-Vergleich.

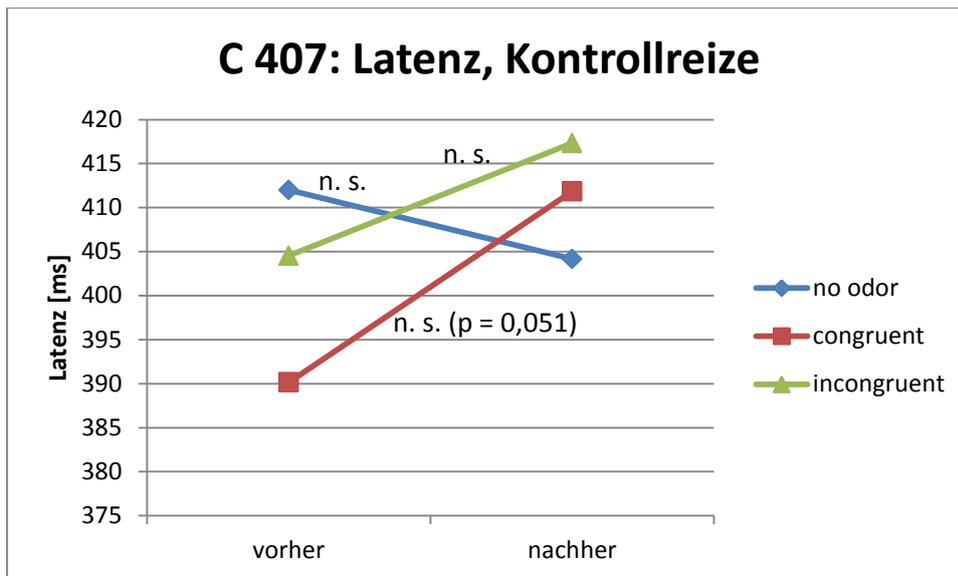


Abbildung 32 – Latenz der GFP-Maxima für Kontrollreize im Bereich der Komponenten C 407. Ausschließlich für die Bedingung „kongruent“ ergibt sich die Tendenz einer Latenzerhöhung in der zweiten Sitzung.

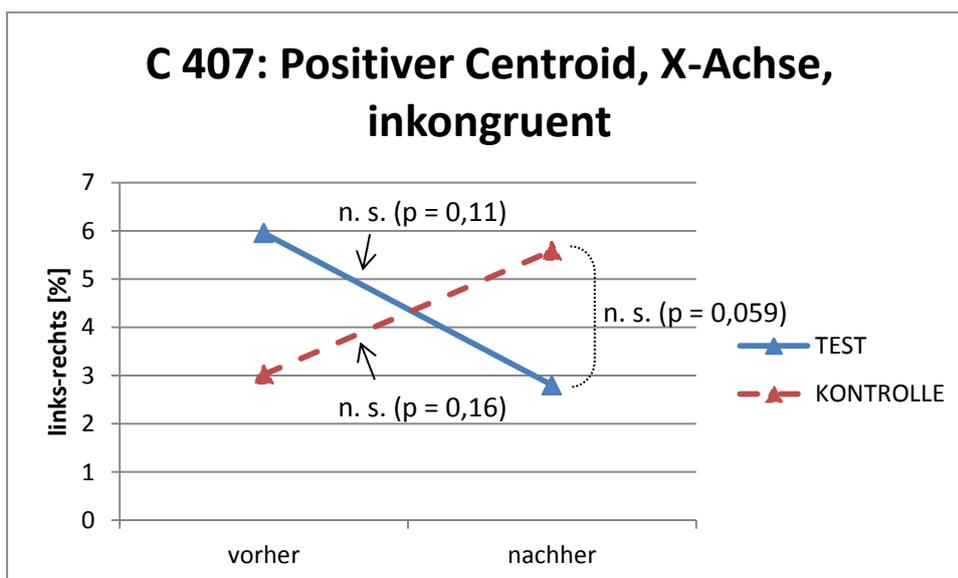


Abbildung 33 – Mittlere Position des positiven Centroiden zum Zeitpunkt des jeweiligen GFP-Maximums auf der x-Achse für die Bedingung „inkongruent“, d.h. unterschiedliche Gerüche in Lern- (vorher) und Testphase (nachher). Aufmerksam wird man auf diese Konstellation erst durch die starke Tendenz eines Unterschiedes zwischen Test- und Kontrollreizen, der vor dem Lernen noch nicht besteht. Signifikanzen sind allerdings weder im t-Test noch in der Varianzanalyse zu beobachten.

C704

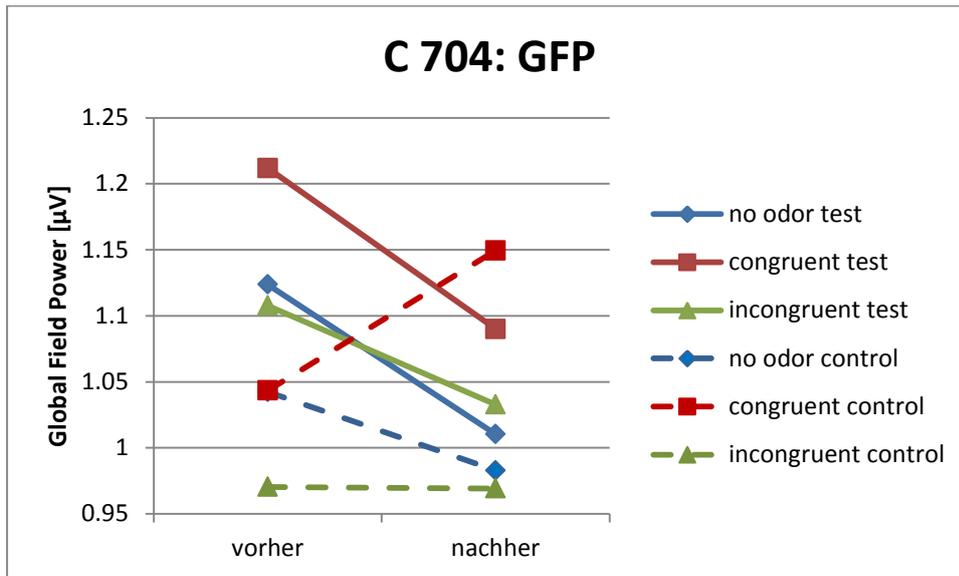


Abbildung 34 - Global Field Power für alle Bedingungen, Zeitpunkte und Stimulustypen im Zeitfenster der Komponente C704.

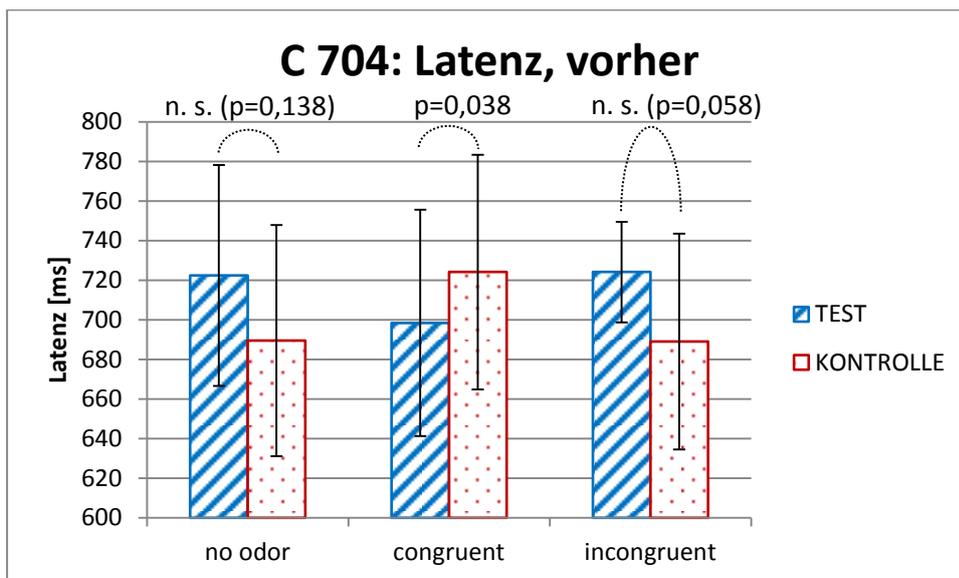


Abbildung 35 - Vergleich von Test- und Kontrollreizen hinsichtlich ihrer Latenz zum Zeitpunkt des GFP-Gipfels im Zeitfenster der C704-Komponente zwischen 600 und 789 ms. Zeitpunkt „vorher“. Inklusive 2 x SD.

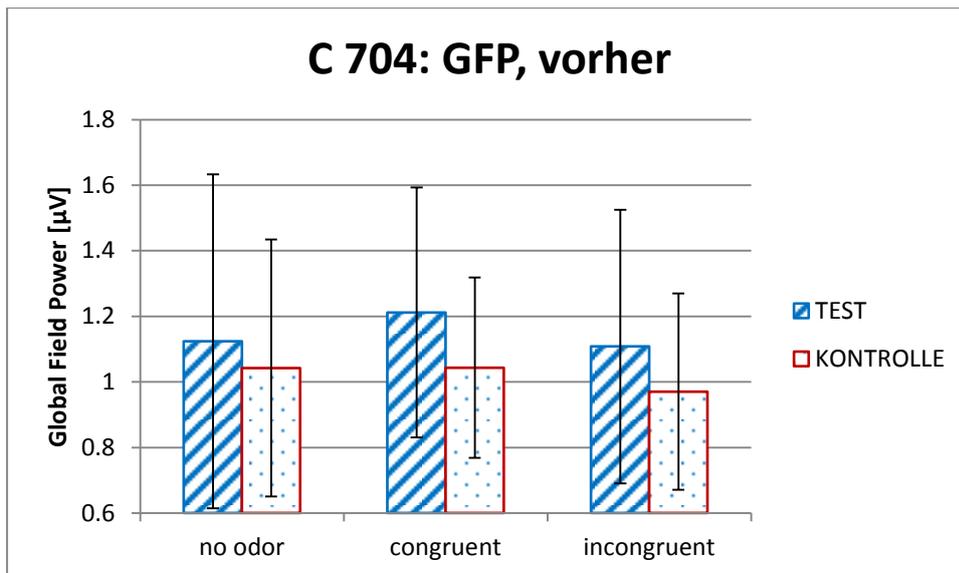


Abbildung 36 – Vergleich von Test- und Kontrollreizen hinsichtlich ihrer Global Field Power im Zeitfenster der C704-Komponente zwischen 600 und 789 ms vor dem Lernen, d.h. zum Zeitpunkt „vorher“. Inklusive 2 x SD.

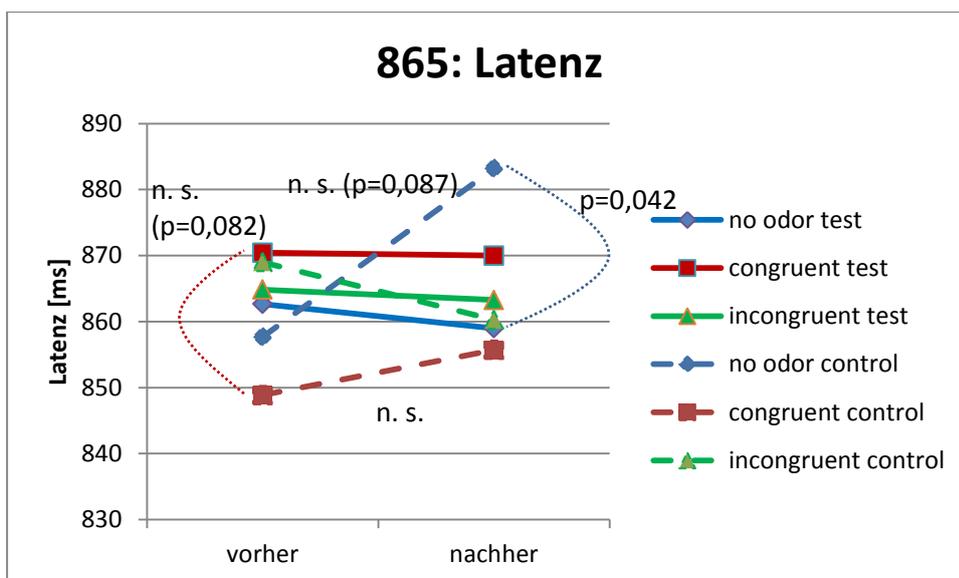


Abbildung 37 – Latenz der C865 für Test- und Kontrollreize, vorher und nachher, in verschiedenen Geruchsbedingungen. In der Tendenz wird deutlich, dass in der Bedingung „geruchlos“ (d.h. ohne Geruch) die Latenz der Kontrollreize nach dem Lernen – auch im Vergleich zu den Testreizen – zunimmt (gepaarte t-Tests, zweiseitig). Eine Signifikanz in der ANOVA ergibt sich nicht.

Übersicht über die Ergebnisse (Vorher-Nachher-t-Tests)

Tabelle 7 - Übersichtstabelle über die Ergebnisse. Angegeben sind jeweils Veränderungen von vorher zu nachher. Zeichen ohne Klammern stehen für einen p-Wert <0,05 im gepaarten t-Test, Zeichen in einer Klammer () für p-Werte <0,1 und Werte in zwei Klammern für Tendenzen mit p-Werten größer als 0,1. + Zunahme, - Abnahme, p posterior, a anterior, R rechts, L links. Keine Korrektur für multiples Testen.

		C117			C215			C407			C704			C865		
		nood	cong	inco	nood	cong	inco	nood	cong	inco	nood	cong	inco	nood	cong	inco
Latenz	T	+														
	C							(+)		((-))				(+)		
GFP	T										((-))					
	C	-	+	((+))				+			((+))					
pos Centr X	T									((-))						
	C				(L)	((L))	((L))				((+))					
pos Centr Y	T										((p))					
	C	p	p	((p))												
neg Centr X	T									((R))						
	C		R								((R))					
neg Centr Y	T						((p))									
	C		a	a			((a))									

Fragebögen

Vokabelliste (Auszug)

Liste A - Lernen

牛	Kuh
川	Fluss
毛	Haare
少	wenig
十	zehn
木	Baum
手	Hand
八	acht

Vokabeltest (Auszug)

Liste B -
Wiedergabe

Versuchsaufbau:
VP-Nummer:

千
六
岩
少
三
牛
四
米

Kanji-Zeichen

Anmerkung: Himmel* entspricht hier der weltlichen Bedeutung im Sinne von Luft.

Nummer	Symbol	Deutsch	Kategorie	Listenpos. beim Lernen	Listenpos. beim Test	Verwendung als
1	三	drei	A	40	5	TEST
2	六	sechs	A	28	2	TEST
3	十	zehn	A	5	16	TEST
4	百	hundert	A	23	35	TEST
5	千	tausend	A	30	1	TEST
6	丸	Kreis	B	14	13	TEST
7	少	wenig	B	4	4	TEST
8	今	jetzt	B	19	19	TEST
9	内	innen	B	33	18	TEST
10	多	viel	B	22	29	TEST
11	牛	Kuh	C	1	6	TEST
12	毛	Haare	C	3	23	TEST

13	母	Mutter	C	39	11	TEST
14	心	Herz	C	31	20	TEST
15	米	Reis	C	35	8	TEST
16	木	Baum	D	6	27	TEST
17	竹	Bambus	D	21	33	TEST
18	岩	Felsen	D	37	3	TEST
19	谷	Tal	D	25	26	TEST
20	花	Blume	D	38	15	TEST
21	四	vier	A	9	7	TEST
22	五	fünf	A	27	21	TEST
23	七	sieben	A	29	17	TEST
24	八	acht	A	8	25	TEST
25	九	neun	A	15	32	TEST
26	小	klein	B	34	37	TEST
27	中	Mitte	B	32	10	TEST
28	白	weiss	B	17	34	TEST
29	上	oben	B	11	39	TEST
30	下	unten	B	18	24	TEST
31	人	Mensch	C	12	30	TEST
32	女	Frau	C	24	12	TEST
33	口	Mund	C	10	22	TEST
34	手	Hand	C	7	31	TEST
35	目	Auge	C	16	9	TEST
36	水	Wasser	D	13	14	TEST
37	山	Berg	D	36	40	TEST
38	土	Erde	D	20	36	TEST
39	川	Fluss	D	2	38	TEST
40	石	Stein	D	26	28	TEST
41	万	zehntausend	A			KONTROLLE
42	兆	billion	A			KONTROLLE
43	廿	zwanzig	A			KONTROLLE
44	卅	dreißig	A			KONTROLLE
45	弍	zwei	A			KONTROLLE
46	大	groß	B			KONTROLLE
47	方	auf	B			KONTROLLE
48	早	früh	B			KONTROLLE
49	外	außen	B			KONTROLLE
50	同	gleich	B			KONTROLLE
51	兄	Bruder	C			KONTROLLE
52	王	König	C			KONTROLLE
53	虫	Insekt	C			KONTROLLE
54	肉	Fleisch	C			KONTROLLE
55	羊	Schaf	C			KONTROLLE
56	天	Himmel	D			KONTROLLE
57	月	Mond	D			KONTROLLE
58	火	Feuer	D			KONTROLLE

59	光	Licht	D	KONTROLLE
60	池	Teich	D	KONTROLLE
61	立	stehen	B	KONTROLLE
62	正	richtig	B	KONTROLLE
63	右	recht	B	KONTROLLE
64	左	link	B	KONTROLLE
65	年	Jahr	B	KONTROLLE
66	出	ausgehen	B	KONTROLLE
67	赤	Rot	B	KONTROLLE
68	見	sehen	B	KONTROLLE
69	青	Blau	B	KONTROLLE
70	音	Schall	B	KONTROLLE
71	犬	Hund	C	KONTROLLE
72	耳	Ohr	C	KONTROLLE
73	羽	Feder	C	KONTROLLE
74	足	Fuß	C	KONTROLLE
75	貝	Muschel	C	KONTROLLE
76	町	Stadt	D	KONTROLLE
77	村	Dorf	D	KONTROLLE
78	雨	Regen	D	KONTROLLE
79	空	Himmel*	D	KONTROLLE
80	草	Gras	D	KONTROLLE

Versuchspersonen

Alle Versuchspersonen, deren Antworten und/oder Daten in die Studie eingeflossen sind, werden hier aufgelistet. *) Deutsch wird besser beherrscht als die Muttersprache.

<u>Vers.</u>	<u>Nr</u>	<u>Geruchsbed</u>	<u>Alter</u>	<u>G.</u>	<u>Händgk.</u>	<u>Mutterspr.</u>	<u>Richtig</u>	<u>Falsch</u>	<u>Leer</u>
A	1	geruchlos	39	W	100	Deutsch	34	1	5
A	2	geruchlos	22	M	100	Deutsch	34	3	3
A	3	kongruent	22	W	100	Deutsch	36	2	2
A	4	kongruent	22	M	100	Deutsch	40	0	0
A	5	inkongruent	21	W	90	Deutsch	21	17	2
A	6	kongruent	21	W	90	Russisch	40	0	0
A	7	kongruent	27	W	80	Russisch	40	0	0
A	8	kongruent	20	W	100	Deutsch	32	5	3
A	9	inkongruent	20	W	100	Deutsch	40	0	0
A	10	inkongruent	21	W	100	Deutsch	40	0	0
A	11	inkongruent	21	W	100	Deutsch	39	0	0
A	12	inkongruent	21	W	100	Deutsch	40	0	0
A	13	geruchlos	25	W	30	Deutsch	31	4	5
A	14	inkongruent	22	M	10	Deutsch	40	0	0
A	15	inkongruent	22	W	100	Deutsch	39	0	1
A	16	inkongruent	21	M	90	Deutsch	33	2	5
A	17	geruchlos	23	W	90	Deutsch	34	2	4
A	18	kongruent	22	M	100	Deutsch	39	1	0

A	19	geruchlos	21	W	100	Deutsch	35	1	4
A	20	geruchlos	22	W	100	Deutsch	40	0	0
A	21	geruchlos	27	M	100	Poln./Dt.	26	12	2
A	22	kongruent	23	W	100	Deutsch	35	4	1
A	23	kongruent	28	W	100	Deutsch	40	0	0
A	24	kongruent	21	M	100	Deutsch	31	2	7
A	25	kongruent	21	W	100	Deutsch	35	3	2
A	26	inkongruent	28	W	100	Deutsch	39	1	0
A	28	geruchlos	27	W	100	Deutsch	40	0	0
A	29	geruchlos	21	W	100	Deutsch	40	0	0
A	30	geruchlos	25	W	100	Deutsch	40	0	0
A	31	inkongruent	22	W	100	Deutsch	40	0	0
A	32	inkongruent	23	M	100	Dt./Engl.	24	4	12
E	1	geruchlos	22	M	100	Deutsch	19	19	2
E	2	geruchlos	23	W	100	Deutsch	35	2	3
E	3	inkongruent	22	W	100	Deutsch	29	9	2
E	4	kongruent	19	W	-40	Deutsch	39	0	1
E	5	kongruent	22	M	80	Russisch*	39	0	1
E	6	kongruent	21	W	-80	Deutsch	38	0	2
E	7	geruchlos	29	W	80	Deutsch	30	8	2
E	9	kongruent	26	W	100	Deutsch	37	0	3
E	11	kongruent	24	M	100	Deutsch	22	14	4
E	12	inkongruent	19	W	100	Deutsch	40	0	0
E	13	kongruent	21	W	80	Deutsch	40	0	0
E	14	kongruent	26	W	50	Urdu	39	0	1
E	15	inkongruent	21	W	60	Deutsch	40	0	0
E	16	kongruent	22	W	100	Deutsch	27	13	0
E	17	kongruent	21	M	100	Russisch*	40	0	0
E	18	inkongruent	21	W	100	Deutsch	38	1	1
E	19	geruchlos	22	W	100	Deutsch	22	14	4
E	20	geruchlos	30	W	50	Detusch	37	3	0
E	21	kongruent	27	W	100	Deutsch	39	1	0
E	22	inkongruent	33	M	100	Deutsch	37	2	1
E	23	geruchlos	20	W	-100	Deutsch	38	0	2
E	24	geruchlos	20	M	100	Deutsch	40	0	0
E	25	geruchlos	20	M	60	Deutsch	40	0	0
E	26	inkongruent	21	W	100	Deutsch	38	2	0
E	27	inkongruent	21	M	100	Deutsch	40	0	0
E	28	inkongruent	29	M	90	Deutsch	38	0	2
E	29	geruchlos	21	W	100	Deutsch	39	1	0
E	31	geruchlos	21	W	100	Deutsch	40	0	0
E	32	inkongruent	22	M	80	Deutsch	40	0	0
E	34	geruchlos	21	W	60	Deutsch	15	14	11
E	35	geruchlos	29	M	100	Deutsch	39	1	0
E	36	inkongruent	20	W	80	Deutsch	38	1	1
E	37	kongruent	20	W	-100	Deutsch	28	6	6
E	38	inkongruent	20	W	80	Deutsch	36	1	3
E	39	geruchlos	21	W	100	Deutsch	40	0	0
E	41	kongruent	21	M	100	Russisch*	40	0	0
E	42	kongruent	24	M	80	Deutsch	18	20	2

E	43	geruchlos	22	M	-40	Deutsch	40	0	0
E	44	inkongruent	23	M	100	Deutsch	38	0	2
E	45	geruchlos	27	M	100	Deutsch	35	4	1
E	46	inkongruent	21	M	100	Deutsch	39	1	0
E	47	inkongruent	21	M	100	Deutsch	40	0	0
E	48	kongruent	30	M	80	Deutsch	38	1	1
E	50	kongruent	20	M	100	Deutsch	40	0	0
E	51	inkongruent	22	M	100	Deutsch	40	0	0
E	52	inkongruent	21	W	100	Deutsch	33	2	5
E	53	inkongruent	25	M	50	Deutsch	37	3	0
E	54	kongruent	24	W	100	Russisch*	36	1	3
E	55	inkongruent	22	M	100	Deutsch	32	6	2
E	56	kongruent	27	W	100	Deutsch	38	0	2

Publikationsverzeichnis

Veröffentlichungen

keine

Vorträge

Wuerzer B, Shinoda H, Skrandies W (2012): Zustandsabhängiges Lernen und evozierte Hirnaktivität unter dem Einfluss von Gerüchen – vorläufige Ergebnisse der Dissertation. Vortrag am Physiologischen Institut der JLU Gießen

Wuerzer B, Klein A, Shinoda H, Skrandies W (2013): Visuell evozierte Potentiale und ihre Topographie beim Lernen japanischer Symbole unter Geruchseinflüssen. Vortrag am Physiologischen Institut der JLU Gießen am 30.04.2013

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Marburg, den 18.08.2013

Benjamin Würzer

Danksagungen

Bei Herrn Prof. Dr. Wolfgang Skrandies bedanke ich mich herzlich für die Überlassung des Themas, die wissenschaftlichen Freiräume und Anleitungen, sowie für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Ich danke außerdem Herrn Professor Haruo Shinoda, Tokyo, für die Einteilung und Vorbereitung der Kanji-Symbole.

Herrn Dr. Alexander Klein möchte ich meinen herzlichen Dank für die Hilfe bei der Datenauswertung, die Durchsicht des Methodenteils, vor allem aber für die Programmierung und Bedienung der Programme für die automatisierte Auswertung ausdrücken.

Auch Herr Dr. Christoph Berwanger hat mich auf Unklarheiten in Sprache oder Darstellung hingewiesen, wofür ich mich gerne bedanken möchte.

Meiner Frau Sabrina Bielak-Würzer danke ich für die Geduld während der vielen Stunden getrennt verbrachter Zeit, dem konstanten Verständnis für das Projekt und ihren hilfreichen Kommentaren.

Meine abschließenden Dankesworte widme ich meinen lieben Eltern, Gisela und Dr. Bruno Würzer. Sie haben mir eine glückliche Jugend und Kindheit geschenkt und mich während der Jahre meines Studiums stets bedingungslos unterstützt. Zudem waren sie mir Lehrer in vielen Lebensbereichen und haben mein Interesse an wissenschaftlichen Fragestellungen gefördert. Zuletzt haben auch sie diese Arbeit auf Fehler überprüft.

Interessenskonflikte

Von keiner der beteiligten Firmen habe ich finanzielle oder sachliche Zuwendungen erhalten, insbesondere nicht von den Herstellern von Duftstoffen oder Parfüms.