

Aus dem Institut für Sexualwissenschaft und Sexualmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Neurobiologie der Paarbindung:
Magnetenzephalographische Messung
neurophysiologischer Äquivalente affektiver
Wahrnehmungen im menschlichen Paarbindungserleben
und -verhalten**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Hannes Ole Tiedt

aus Frechen

Datum der Promotion: 25.10.2013

Inhaltsverzeichnis

1	Abstrakt.....	1
2	Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung.....	3
2.1	Theoretische und begriffliche Grundlagen.....	3
2.2	Neurobiologische Grundlagen.....	5
2.2.1	Gesichterverarbeitung: Erkennung von Identität und Expression.....	5
2.2.2	Neurophysiologische Korrelate der Verarbeitung emotionaler Reize.	10
2.2.3	Imagination als intern generierter Wahrnehmungsprozess	16
2.2.4	Limische und mit Belohnung (Reward) assoziierte Hirnstrukturen.....	18
2.2.5	Soziale Kognition: Amygdala, Theory of Mind, Empathie	20
2.2.6	Die neuroendokrine Regulation soziosexueller Verhaltensweisen	21
3	Fragestellung.....	23
4	Material und Methoden	24
4.1	Auswahl der Probanden	24
4.2	Magnetenzephalographie (MEG).....	25
4.2.1	Physiologische und Physikalische Grundlagen.....	25
4.2.2	Detektion neuromagnetischer Signale mittels MEG	27
4.2.3	MEG im Vergleich mit anderen Methoden.....	29
4.3	MEG-Messung	29
4.3.1	Das MEG-System der PTB	29
4.3.2	Vorbereitung der Messung und Instruktion der Versuchspersonen	30
4.3.3	Eigenschaften der Stimuli und Versuchsablauf	30
4.3.4	Experimentsteuerung.....	31
4.3.5	Aufzeichnung und Digitalisierung der Messdaten	31
4.4	Analyse der MEG-Daten	32
4.4.1	Vorverarbeitung und Artefaktbereinigung.....	32
4.4.2	Auswertung von Ereigniskorrelierten Feldern (ERF)	32
4.4.2.1	Frühe ERF	33
4.4.2.2	ERF mit mittlerer und langer Latenz.....	33
4.4.3	Statistische Untersuchung der MEG Ergebnisse.....	34
4.5	Eingesetzte testpsychologische Verfahren	35
4.5.1	Fragebogen zum sexuellen Erleben und Verhalten.....	35

4.5.2	Fragebogen zum Ausmaß der Syndyastischen Erfüllung in Beziehung	36
4.5.3	Passionate Love Scale	36
4.5.4	Ablauf der Testung und Auswertung der Fragebögen	36
5	Ergebnisse	39
5.1	Beschreibung der Stichprobe	39
5.1.1	Ergebnisse der psychometrischen Untersuchung	39
5.2	Ergebnisse der MEG-Messung	42
5.2.1	Auswertung von M100 und M170	42
5.2.2	ERF mit mittlerer und langer Latenz	46
5.3	Korrelationen der Signale mit psychometrischen Daten	52
6	Diskussion	54
6.1	Diskussion der psychometrischen Untersuchung	54
6.2	Diskussion der MEG-Messung	56
6.2.1	Frühe und gesichterspezifische ERF: M100/M170	57
6.2.1.1	Geschlechtsabhängiger Unterschied der Amplitude der M170	59
6.2.2	Das magnetische Äquivalent des late positive potentials (mLPP)	60
6.2.2.1	Dauer und Ausprägung des mLPP im Vergleich zur Literatur	62
6.2.2.2	Affektive Prozesse: Emotion und Motivation	64
6.2.2.3	Kognitive Prozesse: Aufmerksamkeit und Gedächtnis	67
6.2.2.4	Stimuluseigenschaften als Determinanten des mLPP	69
6.2.2.5	Zusammenfassung der diskutierten Einflussgrößen des mLPP	71
6.2.3	Potentielle Lokalisierung der zugrunde liegenden Strukturen	71
6.3	Limitationen und Ausblick	73
7	Literaturverzeichnis	75
8	Erklärung	89
9	Lebenslauf	91
10	Publikationsliste	92
11	Danksagung	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellvorstellungen der Gesichterverarbeitung.....	7
Abbildung 2: M170 bei Präsentation von Gesichtern im Vergleich zu anderen Objekten.....	8
Abbildung 3: M100 und M170 als Korrelate der Gesichterverarbeitung.	8
Abbildung 4: Late Positive Potential (LPP).....	11
Abbildung 5: Late Positive Potential (LPP) und magnetisches Äquivalent (mLPP/LPP-m)	15
Abbildung 6: Elektrophysiologische Grundlagen von EEG und MEG	26
Abbildung 7: Beziehung zwischen Neuroanatomie und EEG und MEG-Signal.....	27
Abbildung 8: Instrumentation der MEG	28
Abbildung 9: M100 und M170 (Zeitkurven und Feldkarten)	43
Abbildung 10: Geschlechterunterschied der M170-Amplitude.	45
Abbildung 11: ERF-Komponenten im rechten Sensorencluster 0-1000 ms.....	47
Abbildung 12: Signalverlauf 0-6000 ms	49
Abbildung 13: Ausbreitung des magnetischen Feldes (difference maps).....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertung der psychometrischen Untersuchung.....	41
Tabelle 2: Auswertung der M100 und M170	44
Tabelle 3: ANOVA Effekte und Post-hoc Vergleiche für die Zeitfenster 0-2000 ms	50

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Varianzanalyse (analysis of variance)
EEG	Elektroenzephalographie
EPN	early posterior negativity (ERP-Komponente)
ERP	Ereigniskorrelierte Potentiale (event-related potentials)
ERF	Ereigniskorrelierte Felder (event-related fields)
FA-SEB	Fragebogen zur syndyastischen Erfüllung in Beziehungen
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
FSEV	Fragebogen zum sexuellen Erleben und Verhalten
ICA	Independent Component Analysis
LPP	late positive potential (ERP-Komponente)
M	Mittelwert
MEG	Magnetenzephalographie
PET	Positronen Emissions Tomographie
PLS	Passionate Love Scale
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
VBA	Visual Basic for Applications

1 Abstrakt

Die Ausprägung von exklusiven Bindungen ist ein spezieübergreifendes und beim Menschen pankulturell beobachtetes Phänomen. Untersuchungen zur neurobiologischen Grundlage dieses Verhaltens umfassen meistens die Analyse von neuralen Prozessen während der Verarbeitung des Gesichts einer geliebten Person. Vertraute Gesichter transportieren eine Fülle an sozialen Informationen und sind besondere visuelle Reize, die einzigartige Empfindungen von Nähe und Vertrauen signalisieren. Studien mittels bildgebender und elektrophysiologischer Methoden konnten zeigen, dass dies durch distinktes Muster an Hirnaktivität reflektiert wird. Ziel dieser Untersuchung war es, mittels Magnetenzephalographie (MEG) späte und lang anhaltende Veränderungen magnetischer Aktivität während der Verarbeitung geliebter Gesichter im Vergleich zu freundschaftlich bekannten zu erfassen. Im experimentellen Paradigma wurde die passive Betrachtung der Gesichter mit emotionaler Imagination kombiniert, um die affektive Dimension der Stimuli zu verstärken. Um Informationen zur emotionalen Beziehung der Probanden/innen zu erhalten wurde eine psychometrische Untersuchung unter Verwendung verschiedener Fragebögen einbezogen. Darin zeigte sich bei den Teilnehmern/innen ein hohes Maß an Beziehungszufriedenheit. Als Hauptergebnis der MEG-Messung zeigte sich ein signifikanter Effekt der Bildkategorie auf das magnetische Äquivalent des in Studien mit ereignis-korrelierten Potentialen beschriebenen *late positive potential* (LPP). Die Modulation des magnetischen Äquivalents des LPP (mLPP) war mit maximaler Ausprägung zwischen 400-700 ms in bilateralen fronto-parietalen Sensoren-Gruppen zu beobachten und hielt sekundenlang an. Frühe, gesichterspezifische Signale wie M100 oder M170 wiesen keine Effekte der Stimuluskategorie auf. Die Ergebnisse zeigen, wie sehr persönlicher Kontext und affektive Prozesse die Verarbeitung von Gesichtern beeinflussen. Emotionale Imagination könnte die emotional und motivational relevanten Aspekte der visuellen Reize verstärkt und den hier beobachteten, sehr starken Effekt bedingt haben. Eine Wechselwirkung zwischen sensorischer *bottom-up* Verarbeitung und *top-down* Modulation könnte so eine anhaltende und verstärkte Aktivität in fronto-parietalen Netzwerken hervorrufen, welche bereits als Grundlage der hier beobachteten späten Signale diskutiert wurden. Diese Studie demonstriert erstmals ein magnetisches Äquivalent des LPP (mLPP) während der Wahrnehmung geliebter Gesichter und bildet einen Ausgangspunkt für weitere MEG-Untersuchungen zu späten, post-sensorischen Stadien der Gesichterverarbeitung.

Abstract

The formation of strong emotional and social bonds is observed in different species and across cultures in humans. Studies investigating the neurobiological basis of bonding behaviour in most cases involve analyzing the processing of loved faces. Personally familiar faces convey a wealth of social information and are prominent visual cues signalling unique feelings of intimacy and trust. This is reflected by a distinct pattern of brain activity, as demonstrated by research using neuroimaging as well as electrophysiological methods. Aim of this investigation was to study late and sustained shifts of magnetic activity while viewing loved faces as compared to faces of friends using magnetoencephalography (MEG). The experimental paradigm combined passive viewing and emotional imagery to enhance the affective dimension of stimuli. In order to obtain information about the emotional relationship of the participants a psychometric examination including several questionnaires was conducted. The analysis of questionnaires indicates a high degree of satisfaction with the relationship. The main result of MEG-analysis was a significant effect of face-category on the magnetic counterpart of the late positive potential (LPP) observed in recordings of event-related potentials. The modulation of the magnetic equivalent of the LPP (mLPP) was most pronounced between 400-700 ms in bilateral, fronto-parietal sensor-clusters and sustained until seconds post-stimulus. Early and face-specific signals as M100 and M170 did not exhibit any effects of picture-category. These findings emphasize that personal context and affective contributions influence face-processing to a great extent. Emotional imagery could have enhanced the emotionally and motivationally relevant aspects of loved faces, accounting for the very pronounced effect observed here. Thus, an interaction of bottom-up sensory processing and top-down modulation might result in increased sustained activation of fronto-parietal networks which have been suggested as the basis of late latency signals. This study is the first to show a magnetic counterpart of the LPP (mLPP) during perceiving loved faces, forming the basis for further investigations using MEG concerning late, post-sensory stages of face-processing.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Theoretische und begriffliche Grundlagen

Liebe und Sexualität als Alltagsbegriffe provozieren eine unendliche Fülle von Assoziationen, weil sie zentrale Lebensbereiche abbilden. Hinzu kommt, dass sich völlig verschiedene Wissenschaftsrichtungen, Kunst und Populärkultur diesen Themen widmen. Um sie einer wissenschaftlichen Perspektive zugänglich zu machen, muss zunächst mittels einer definitorischen Einengung das Wesentliche extrahiert werden, ohne zugleich Essentielles zu ignorieren. Da ein naturwissenschaftlicher Blickwinkel auf menschliches Bindungserleben weit in Diskussionen um kulturelle und biologische Determinanten verweist, deren Darstellung jenseits dieser Arbeit liegt, soll im Folgenden das theoretische und begriffliche Fundament dieser Untersuchung dargestellt werden. Die wichtigsten theoretischen Bezugspunkte dieser Studie sind Sexualmedizin, Bindungstheorie, Evolutionstheorie und die moderne Medizin.

Die Sexualmedizin begreift menschliche Sexualität als multidimensionalen und multifunktionalen Aspekt der menschlichen Existenz, die sich aus Fortpflanzungsdimension, Lustdimension und Beziehungsdimension zusammensetzt. Diese bieten naturgemäß Überschneidungen und stehen in enger Beziehung zueinander, aber auch jede besitzt für sich spezifische Funktionen für das menschliche Leben [1]. Für die Beziehungsdimension wurde der auf Aristoteles zurückgehende Begriff der Syndyastik eingeführt [1], der auch im Weiteren verwendet wird. Der Begriff Syndyastik beschreibt Merkmale von intensiver Vertrautheit und gegenseitiger Zugehörigkeit, die eine Paarbeziehung von anderen sozialen Beziehungen unterscheidet. Diese Studie basiert in der thematischen Fokussierung auf die Beziehungsdimension auf dem multidimensionalen Verständnis menschlicher Sexualität. Darüber hinaus ist Sexualität auf Ebene des Erlebens und Verhaltens biologisch, psychologisch und sozial determiniert [1], so dass ein biopsychosoziales Verständnis notwendig ist, um der Komplexität des Themas gerecht zu werden.

Ein weiterer wichtiger Bezugspunkt ist die im Wesentlichen von Bowlby und Ainsworth formulierte Bindungstheorie. Die Bindungstheorie postulierte, dass Kinder eine Bindung zu ihren primären Bezugspersonen entwickeln, welche lebenswichtige Bedürfnisse nach Nähe, Körperwärme und Sicherheit erfüllen. Das Brechen dieser Bindung kann permanente negative

Folgen für das Kind haben, die sich bereits im Verhalten von Kleinkindern zeigen. Die Entstehung der Bindungstheorie umfasst ebenfalls biologische, psychologische und soziale Einflussfaktoren [2]. Eine besondere Rolle spielten dabei die Arbeiten des Primatologen Harlow, der demonstrierte, dass bei Rhesusaffen die Muttertiere für die Affenbabies eine lebenswichtige emotionale Funktion haben, die über das bloße Ernähren hinausgeht und über Körperkontakt vermittelt wird. Die Deprivation dieser emotionalen Grundbedürfnisse war im Experiment tödlich, bzw. die Minimierung dieser lebenswichtigen Kontakte zur Mutter hatte destruktive Folgen für das spätere Sozialverhalten der Affen [3]. Als Grundlage dieser Bindung wird ein im ZNS angesiedeltes Bindungssystem vermutet, dessen strukturelle und funktionelle Eigenschaften noch weitgehend unbekannt sind, dessen Existenz aber eine wichtige Grundannahme dieser Studie ist [1]. Hazan und Shaver [4] erweiterten diese ursprünglich auf Mutter-Kind Interaktionen bezogenen Inhalte schließlich auf Liebesbeziehungen zwischen Erwachsenen: Sie formulieren das Entstehen von Bindungen zwischen Erwachsenen als Integration von drei biologischen Systemen, die sie als *attachment*, *caregiving* und *sex*, also Bindung, Fürsorglichkeit und Sex bezeichnen [4]. Die persönlichen Erfahrungen in der Mutter-Kind Interaktion prägen damit auch das Erleben und Verhalten in Liebesbeziehungen als Erwachsener. Hazan und Shaver sehen in der Bindungstheorie eine Perspektive, welche der Integration von biopsychosozialen Faktoren gerecht wird:

„The attachment-theory approach to romantic love suggests that love is a biological as well as a social process, based in the nervous system and serving one or more important functions.“ [4], S.13.

Dieses Zitat macht deutlich, dass die Bindungstheorie, insbesondere in ihrer Anwendung auf Liebesbeziehungen, die fundamentale Hypothese dieser Studie formuliert, nämlich dass Liebe, bzw. Syndyastik eine biologische Grundlage hat, deren Korrelate im ZNS bislang kaum charakterisiert sind. Unterstützt wird diese Annahme durch den Nachweis, dass das Phänomen starker sozialer Bindungen spezieübergreifend [5] und beim Menschen pankulturell [6] zu beobachten ist. Das verweist auf die evolutionsbiologische Perspektive, welche für das Verständnis von Sexualität vor allem die Aspekte Reproduktion und Arterhaltung betont. Formen, in denen sich sexuelles Verhalten organisiert, also z.B. Monogamie, Polyandrie oder Polygynie, etc. [5], sind jeweils Ergebnisse eines innovativen, evolutionären Adaptionsvorganges, der das Überleben der Art sichern soll. Als Grundlage dafür sind nach Ansicht Helen Fishers im Laufe der Evolution emotionale, bzw. motivationale Systeme entstanden, die jeweils Aspekte menschlicher Reproduktion umfassen: Lust, Attraktion und

Bindung, die mit distinkten, untereinander verbundenen neurobiologischen Systemen verknüpft sind [7]. Eine wichtige Rolle spielt dabei zunächst die Auswahl des Partners nach evolutionär günstigen Attributen [8]. Welche Faktoren konkret zur starken Präsenz von Bindungen im soziosexuellen Verhaltensrepertoire einer Spezies führen, ist allerdings bislang ungeklärt [5].

Für das Menschenbild in der modernen Medizin schließlich besitzen soziale und insbesondere syndyastische Bindungen hohe Relevanz als protektive und salutogene Faktoren. Die steigende Beachtung der Bedeutung der Salutogenese [9] verweist auf soziale [10] und syndyastische [1] Beziehungen als wichtige Ressourcen von Gesundheit.

2.2 Neurobiologische Grundlagen

Die vorliegende Untersuchung hat zum Ziel, Vorgänge bei der neuronalen Verarbeitung geliebter Gesichter zu untersuchen. Mittels verschiedener Methoden können die Erkennung von Gesichtern und die Verarbeitung der darin kodierten sozialen Informationen sowohl durch Identifikation der beteiligten Hirnstrukturen, als auch mittels Aufzeichnung bioelektrischer oder biomagnetischer Signale mit unterschiedlicher Ausprägung oder zeitlicher Latenz charakterisiert werden. Neben konfiguralen Merkmalen von Gesichtern werden emotional relevante Aspekte mit hoher Priorität wahrgenommen und verarbeitet, was in entsprechend strukturierten Experimenten mit geeigneten Methoden nachgewiesen werden kann. Im Folgenden sollen die Grundlagen der Verarbeitung von Gesichtern und emotional relevanter Informationen sowie der Kenntnisstand zur Neurobiologie menschlicher Bindung unter Beachtung aktueller Forschungsliteratur zusammengefasst werden.

2.2.1 Gesichtsverarbeitung: Erkennung von Identität und Expression.

Das Sehen und die Verarbeitung visueller Information spielt eine herausragende Rolle für die Kommunikation und soziale Interaktionen [11]. Die zur Identifikation eines Gesichtes führende Analyse ist ein spezialisierter Prozess mit hoher Relevanz im alltäglichen Leben. Bruce und Young [12] beschreiben diesen Prozess in ihrem einflussreichen kognitiven Modell der Gesichtsverarbeitung: Dementsprechend werden die unterschiedlichen Arten von in Gesichtern enthaltenen Information (z.B. strukturelle in Form von Relation und Konfiguration von Augen, Nase und Mund) in entsprechenden Formen kodiert. Diese Codes, von denen Bruce und Young 7 verschiedene unterscheiden [12] bilden die Grundlage für die weitere sequentielle Analyse des Gesichtes in sog. *face recognition units* (FRU), Anteilen des assoziativen Gedächtnisses, die

schließlich zur Identifikation des Gesichtes führt. Im letzten Schritt wird durch sog. *person identity nodes* (PIN) der Name der dazugehörigen Person aufgerufen. Parallel dazu findet die Analyse von Expression und Lippenbewegungen statt, die nicht unabdingbar für die Identifikation sind, aber wesentliche Faktoren in der weiteren Einordnung des präsentierten Gesichtes. In diesem theoretischen Ansatz aus der kognitiven Psychologie wird kein Bezug auf die beteiligten neuronalen Strukturen genommen. Es werden vor allem 3 Regionen beschrieben, die eine spezifische Aktivierung durch Gesichter zeigen: die *occipital face area* (OFA, im lateralen okzipitalen Kortex), die *fusiform face area* (FFA, im Gyrus fusiformis) und der *superior temporal sulcus* (STS). Haxby [13] und, in einer Weiterentwicklung diesen Ansatzes, Gobbini [14] beschreiben in inhaltlicher Übereinstimmung mit Bruce und Young ein neuroanatomisch und funktionell definiertes Netzwerk für die Verarbeitung von Gesichtern, das sie in ein sog. Kernsystem und ein sog. Erweitertes System (*core system, extended system*) unterteilen. Im Kernsystem wird ein Objekt aufgrund konfiguraler Eigenschaften als Gesicht kategorisiert und die Identität des Gesichtes erkannt [13]. Dieser Prozess findet in den obengenannten okzipito-temporalen Strukturen statt, besonders im auf die Analyse von Gesichtern spezialisierten Gyrus fusiformis (FFA) [15-19], welcher auch als „Eintrittspforte“ in die Gesichter verarbeitenden Netzwerke bezeichnet wird [20]. Die strukturelle Schädigung dieser Areale führt zum charakteristischen neuropsychologischen Defizit der Prosopagnosie, d.h. der Unfähigkeit, Gesichter zu erkennen [21].

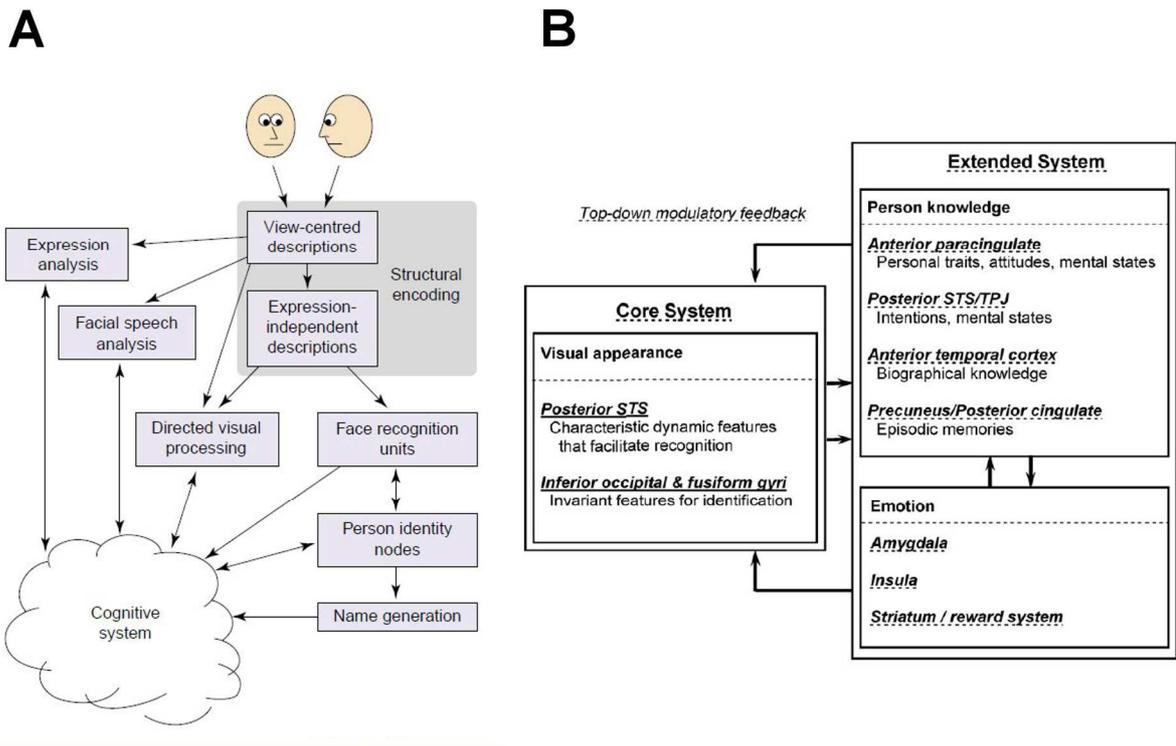


Abbildung 1: Modellvorstellungen der Gesichterverarbeitung

(A) Modell von Bruce und Young in der nach Ellis und Lewis modifizierte Darstellung aus [22]. (B) Das auf Bruce und Young basierende Modell von Haxby et al. [13] in der Erweiterung von Gobbini et al. [14], welches Bezug auf funktionell-neuroanatomische Zusammenhänge während der Verarbeitung vertrauter Gesichter nimmt.

Zeitlich exakte Messungen mittels intrazerebraler Ableitungen sowie EEG und MEG zeigen, dass die ersten obligatorischen Analyseschritte bereits früh zwischen 100-200 ms stattfinden [15-18, 23]. Mittels MEG wurden nach Präsentation von Gesichtern im Vergleich zu Objekten spezifische Signale mit einer Latenz von 100 ms, die sogenannte M100, und nach 170 ms in Form der sogenannten M170 beschrieben: Die M100 wird als Korrelat der Kategorisierung eines Gesichts, also eines sehr frühen Verarbeitungsschrittes aufgefasst. Die M170 gilt als charakteristisches Signal, das mit der korrekten Identifikation eines Gesichtes zusammenhängt [23]. Diese neuromagnetischen Signale entsprechen den mittels EEG beschriebenen P100 und N170 in der Gesichterverarbeitung [24]. Die spezifische Sensitivität der M170 für menschliche Gesichter im Vergleich zu Objekten, Häusern oder Tieren ist in Abbildung 2 dargestellt; M100 und M170 als Korrelate von Kategorisierung und Identifikation [23] in Abbildung 3.

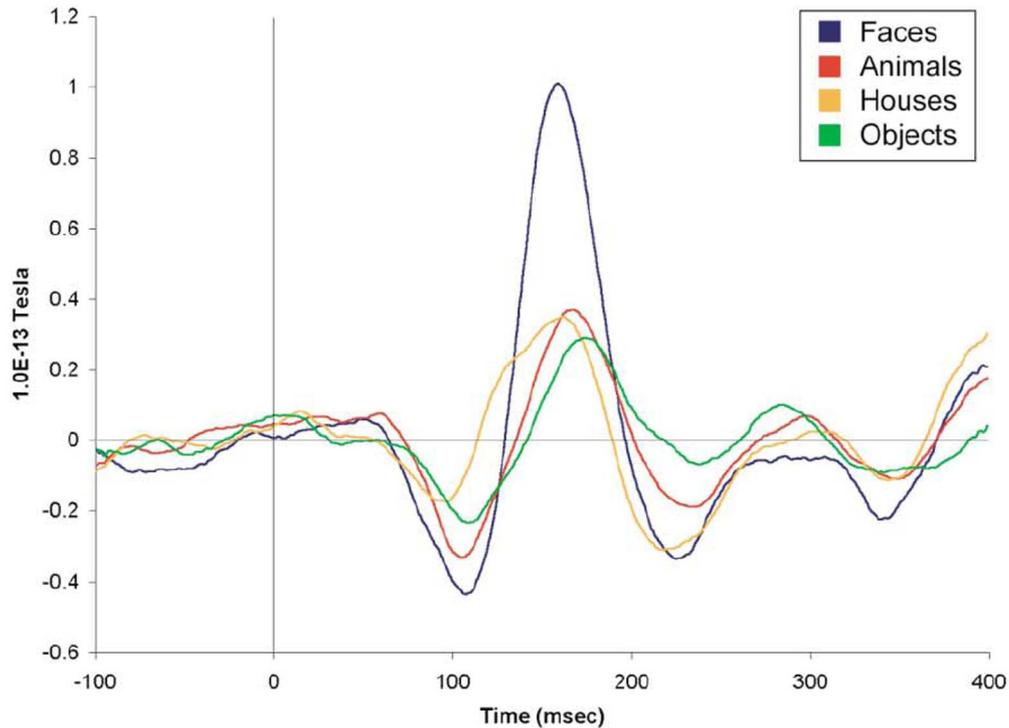


Abbildung 2: M170 bei Präsentation von Gesichtern im Vergleich zu anderen Objekten.

Die Abbildung zeigt in unterschiedlichen Farben dargestellt den Verlauf der magnetischen Aktivität aus einem MEG-Experiment mit einen deutlich größeren *Peak* bei 170 ms (M170) während der Präsentation von Gesichtern (blau) im Vergleich zu diversen Objekten (grün), Häusern (gelb) und Tieren (rot). Abbildung aus [25].

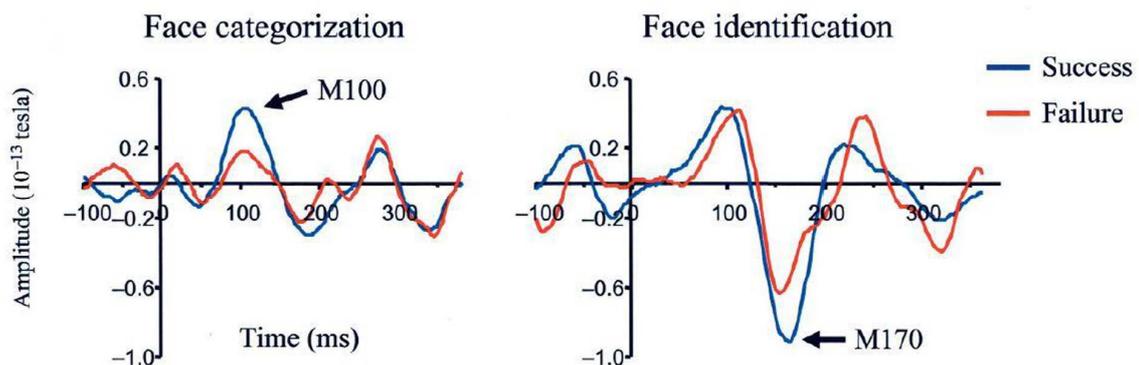


Abbildung 3: M100 und M170 als Korrelate der Gesichterverarbeitung.

Links die M100 als positiver Peak, rechts M170 als negativer Peak; die blaue Kurve basiert auf Trials, in denen Gesichter korrekt kategorisiert (höhere Amplitude der M100) und identifiziert wurden (M170). Abbildung aus [23].

Während für diesen Prozess Konfiguration und Relation der Elemente eines Gesichtes, jedenfalls die invarianten Eigenschaften ausschlaggebend sind, werden sozial relevante Informationen aus varianten Aspekten eines Gesichtes, z.B. Blickrichtung oder emotionale Expressionen im sog. Erweiterten System [13, 14] extrahiert und analysiert [26]. Neuroanatomische Anteile dieses Netzwerkes sind der temporale (Sulcus temporalis superior, anteriorer Temporallappen) und parietale Kortex sowie anteriorer parazingulärer Kortex, Precuneus und posteriores Zingulum. Hier werden Blickrichtung, Expression sowie Hand- und Mundbewegungen prozessiert [27, 28], während durch Verknüpfung mit Amygdala, Insula und Anteilen des Belohnungssystem (Striatum, Orbitofrontalkortex) emotionale Informationen entschlüsselt werden [14, 26, 29]. An der weiteren Evaluation der in Gesichtern kodierten sozialen Information sind außerdem Hirnareale beteiligt, die mit komplexen kognitiven und emotionalen Prozessen wie *mentalizing* oder *theory of mind* [30, 31] und Empathie [32] assoziiert werden. *mentalizing* und der synonym verwendete Begriff *theory of mind* bezeichnen die kognitive Fähigkeit, soziale Informationen zu entschlüsseln und aus diesen auf die Intentionen anderer zu schließen [31]. Nicht zuletzt sind Gesichter in der Lage, subjektive emotionale Reaktionen hervor zu rufen. In welchem Maße solche Prozesse ablaufen, ist dabei abhängig vom Grad der Bekanntheit der anderen Person und der Art der Beziehung, die zu dieser Person besteht [14].

Dieses Konzept impliziert zunächst einen zeitlich hierarchisch ablaufenden Wahrnehmungsprozess, in dem sequentiell Objektkategorie, Identität und je nachdem Expression, Blickrichtung, Intention etc. analysiert werden. Die Identifikation und Verarbeitung eines Gesichtes beruht aber vielmehr auf zeitlich parallel ablaufenden, untereinander unabhängigen Prozessen in einem funktionell definierten Netzwerk mehrerer Hirnstrukturen [13, 16, 20, 33]. Bereits die frühesten Signale zwischen 100-200 ms sind gleichzeitig in okzipito-temporalen [34] und für Gesichter mit emotionalem Ausdruck in frontalen Arealen [35] nachweisbar; ebenso sind die weiteren perzeptiven Stadien zwischen 200-500 ms in mehreren temporalen Strukturen lokalisiert (Gyrus fusiformis, mediale Temporalpole, Hippocampus, parahippocampaler Gyrus, perirhinaler Kortex) [16]. Neben den parallel stattfindenden Analyseschritten in diesen Strukturen existieren zahlreiche Hinweise für einen wechselseitig modulierenden Einfluss des Faktors der Emotionalität in bereits frühen Stadien der Verarbeitung von Gesichtern bereits auf der Ebene der Identifikation [36]. Während das Ausmaß der Variation der frühen gesichterspezifischen Signale unklar ist und einzelne Studien keinen Einfluss varianter Aspekte auf die N170/M170 Antwort berichten [37], zeigen andere eine unterschiedliche Ausprägung je nach Familiarität [38], Blickrichtung [39] und Expression [40].

Möglicherweise sind solche frühen Effekte wesentlich durch eine aufgabenspezifische Modulation von Aufmerksamkeit bedingt; hierfür sprechen Befunde, die während der alternierenden Präsentation von Gesichtern und Häusern in Reaktion auf die Gesichter eine unterschiedliche Signalstärke bei 230 ms zeigen, je nachdem, ob die Probanden/innen vor dem Versuch instruiert wurden, ihre Aufmerksamkeit auf die präsentierten Gesichter oder die Häuser zu richten [41]. Eine weitere Arbeit konnte schließlich einen Effekt auf die Amplitude der M170 zeigen, jedoch nur wenn die Versuchsteilnehmer auf den emotionalen Ausdruck des Gesichts achten sollten, bei der Aufgabe, das Geschlecht der Person zu benennen, zeigte sich ein solcher Effekt auf die Amplitude nicht [42].

Die Erkennung der Identität ist die Voraussetzung für die weitere semantische Verarbeitung, das Abrufen von Gedächtnisinhalten, die Evaluation des emotionalen Kontexts und die Integration individueller und kontextueller Faktoren, so dass diese Schritte in einem späteren Zeitbereich nach mindestens 200 ms stattfinden [33, 43, 44]. Damit sind typische Signale mittlerer und langer Latenz verknüpft, die unter dem Gesichtspunkt der visuellen Verarbeitung emotionaler Stimuli im nächsten Abschnitt dargestellt werden.

2.2.2 Neurophysiologische Korrelate der Verarbeitung emotionaler Reize.

Der emotionale Kontext visueller Informationen liefert gleichzeitig Hinweise auf potentielle aversive oder belohnungsassoziierte Reize und Situationen und besitzt daher hohe Relevanz und wird vom Gehirn mit hoher Priorität verarbeitet. EEG-Untersuchungen mittels ereigniskorrelierter Potentiale (*event-related potential*, ERP) mit hoher zeitlicher Auflösung zeigen, dass die Wahrnehmung und Verarbeitung emotionalen Materials bioelektrische Signale mit kurzer ebenso wie mittlerer und langer Latenz moduliert; dabei differiert je nach emotionalem oder neutralem Inhalt mehr die Amplitude der Signale als der zeitliche Ablauf [45]. Frühe Signale mit einer Latenz im Bereich 100-200 ms (die ERP-Komponenten P1 und N1) in Reaktion auf emotionale Stimuli reflektieren dabei die Detektion des emotionalen Inhaltes im Rahmen eines schnellen, obligatorischen Stadiums der Verarbeitung visueller Information, die besonders durch Manipulation der physischen Eigenschaften der Stimuli modulierbar ist [46-48]. Etwas später auftretende Signale mittlerer Latenz (200-300 ms) wie die N2-Komponente und die *early posterior negativity* (EPN) reflektieren Stimulus-Diskrimination und selektive visuelle Aufmerksamkeit, die emotionale Stimuli auf sich ziehen oder die durch kognitive Kontrolle auf bestimmte Reize gerichtet wird [49-51]. Noch später auftretende Signale (ab 300 ms) mit maximaler Ausprägung zwischen 400-700 ms dagegen reflektieren die Evaluation der

emotionalen und motivationalen Signifikanz eines Stimulus [52] und parallel stattfindende Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozesse [50, 53] in einem post-sensorischen Stadium der visuellen Wahrnehmung [54]. Diese mitunter sekundenlang für die gesamte Epoche andauernde bioelektrische Aktivität wird nach der Polarität im EEG inkonsistent als *late positive potential* (LPP) [46, 50, 55], *late positive component* oder *positive slow wave* bezeichnet. Teilweise wird der Begriff der *positive slow wave* auch verwendet, um eine sekundenlang anhaltende Aktivität zu kennzeichnen, während der Begriff *late positive potential* auf den Zeitbereich 400-700 ms bezogen wird [44]. Der Mehrheit der Artikel zu diesem Thema entsprechend wird nachfolgend der Begriff *late positive potential* (bzw. die Abkürzung LPP) verwendet und nicht weiter zwischen LPP und *positive slow wave* differenziert.

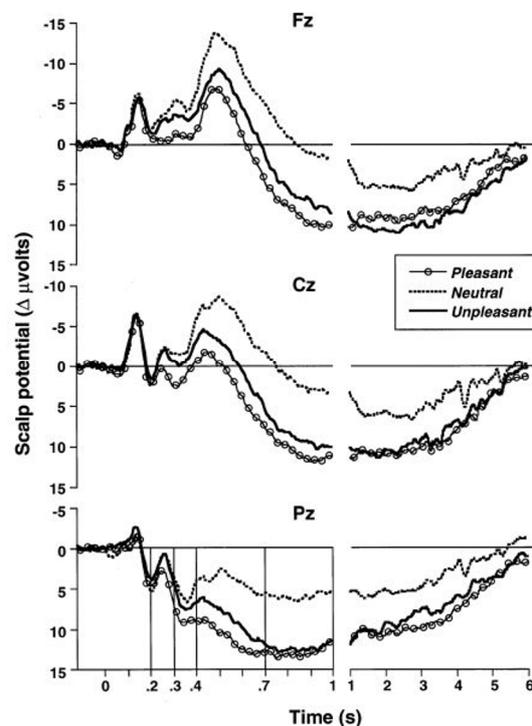


Abbildung 4: Late Positive Potential (LPP)

Dargestellt ist das *late positive potential* (LPP) aus [55]; präsentiert wurden neutrale sowie positive und negative emotionale Stimuli. Im linken Teil ist der Zeitbereich 0-1000 ms dargestellt, im rechten in größerer Aufteilung die bis Ende der Bildpräsentation (6 s) anhaltende Aktivität, welche manchmal als *positive slow wave* vom LPP abgegrenzt wird. Deutlich die zentral (Fz, Cz, Pz) und posterior betonte Ausprägung des positiven (nach unten dargestellten) Signals.

Diese Signale treten anschließend an die vor allem kognitive Prozesse kodierende positive P3 (auch als P300-Potential bezeichnet) auf; diese klassischerweise in sog. Oddball-Paradigmen

beobachtete ERP-Komponente kann wiederum in die etwas frühere, frontal lokalisierte und mit Aufmerksamkeit assoziierte P3a-Komponente sowie die spätere, temporo-parietale und mit Gedächtnisprozessen korrelierende P3b-Komponente unterschieden werden [56, 57]. Hierbei wird bereits deutlich, dass die spätere P3b-Komponente und lang anhaltende, positive Signale wie das *late positive potential* zum Teil unscharf und manchmal nur aufgrund der Signaldauer voneinander zu trennen sind [45]; eine Arbeit, in der mittels *principal component analysis* (PCA) verschiedene Anteile später ERP-Komponenten während der visuellen Verarbeitung emotionaler Stimuli differenziert werden konnten, spricht jedoch dafür, dass P3-Prozesse und LPP unterschiedliche Quellen haben und dementsprechend auch unterschiedliche neurale Prozesse kodieren [58]. Verglichen mit neutralen Stimuli ist die Amplitude des LPP deutlich stärker für emotionale Bilder [55], attraktive Gesichter [59] oder Gesichter mit emotionalen Expressionen [33, 50]. Ausschlaggebend ist aber nicht nur der qualitative Unterschied der emotionalen Inhalte, also der Kontrast zwischen positiv oder negativ assoziierten, emotionalen und neutralen Bildern: Vergleicht man positiv konnotierte Reize mit unterschiedlicher motivationaler Relevanz untereinander, also z.B. mit Sport und Freizeit assoziierte Darstellungen mit erotischen Bildern, zeigt sich wiederum innerhalb der positiv-emotionalen Stimuluskategorie eine mit der motivationalen Signifikanz zunehmende Signalstärke des LPP [49, 60].

Diese Abhängigkeit des LPP von evaluativen Vorgängen zeigt sich auch in Untersuchungen, die sowohl für frühe und späte ERPs bei repetitiver Stimulation eine deutliche Habituation des Signals zeigen, die sich bei den frühen Signalen nach einem kurzen Intervall wieder zurückbildet, während das LPP auch über mehrere Blöcke von Stimuluspräsentationen eine Habituation mit abnehmender Salienz des Stimulus zeigt [47]. Als Salienz (im Englischen *saliency* oder *saliency*) wird bezeichnet, in welchem Maß sich ein bestimmter Reiz von anderen unterscheidet, bzw. abhebt. Intensität und Neuigkeit eines Reizes sind dabei wesentliche Einflussgrößen für die Salienz. Frühe ERP-Komponenten zeigen auch im Gegensatz zum LPP eine stärkere Abhängigkeit von Manipulationen der Stimulusgröße [48] oder Komplexität des visuellen Stimulus [46]. Ferrari et al. schließlich zeigten, dass Ausmaß des LPP sowohl von automatischer, ungerichteter als auch durch die Versuchsanordnung gerichteter Aufmerksamkeit abhängt, also gleichermaßen durch aufgaben- und inhaltspezifische Aufmerksamkeit moduliert werden kann [61].

Zusammenfassend sprechen diese Untersuchungen dafür, dass neben der Modulation von Aufmerksamkeit als kognitivem Prozess die affektive und motivationale Dimension visueller Stimuli die späten und lang andauernden, als LPP bezeichneten ERP-Komponenten modulieren.

Wie die Arbeit von Ferrari et al. [61] zeigen weitere Studien, dass das LPP nicht automatisch auftritt, sondern durchaus einem Einfluss kognitiver Prozesse und unterschiedlichem *appraisal*, also der Wahrnehmung der emotionalen Qualität der Stimuli, unterliegt: So wird die Signalstärke des LPP beim Betrachten aversiver Bilder durch willkürliche mentale Kontrolle [62] oder auf neutrale Aspekte dieser Bilder gerichtete Aufmerksamkeit [63, 64] vermindert. Auch unterschiedliche Erwartungen, je nachdem ob neutrale oder emotionale Beschreibungen der Präsentation aversiver Bilder vorausgingen, modulierten das LPP [65]. Als Korrelat dieser *top-down* Modulation ist Aktivität im präfrontalen Kortex [66] im Sinne einer bidirektionalen Beeinflussung des visuellen Verarbeitungspfades denkbar [67].

Die Verarbeitung von Gesichtern moduliert ebenfalls späte ERP-Komponenten, zum einen indem Gesichter durch Attraktivität oder ihren emotionalen Ausdruck selbst Stimuli mit inhärenter emotionaler und motivationaler Qualität sind [33, 59]. Darüber hinaus rufen auch vertraute im Kontrast zu unbekanntem Gesichter ohne explizite emotionale Eigenschaften späte positive Signale im Zeitbereich des LPP hervor [68]. Hierfür sind wahrscheinlich vor allem Gedächtnisprozesse ausschlaggebend, die in der P3b-Komponente kodiert sind [69], wobei der Abruf von semantischem und biographischem Wissen in Reaktion auf bekannte Gesichter eine verstärkte positive Polarität über frontalen Elektroden im Zeitbereich zwischen 250-500 ms und dagegen reine Familiarität, also Erkennen eines zuvor gelernten Gesichts ohne Abruf weiterer Informationen, eine verstärkte Positivität über weiter posterior gelegenen Elektroden zwischen 500-750 ms hervorruft [70]. Diese Erkenntnisse stellen Aufmerksamkeit und Gedächtnis als wesentliche Korrelate der späten ERP-Komponenten in den Vordergrund und verweisen erneut auf die inhaltliche Überlappung und mitunter schwierige Differenzierung zwischen der P3b-Komponente und länger andauernden positiven Potentialen wie dem LPP.

Gesichter von Personen, zu denen eine besondere soziale und emotionale Beziehung besteht, also Eltern, eigene Kinder, Freunde und nicht zuletzt Beziehungspartner, transportieren implizit kodiert sowohl emotionale Eigenschaften von hoher motivationaler Relevanz als auch Familiarität und eine Fülle von mit dem Gesicht als primärem Erkennungsmerkmal einer Person verknüpften kontextuellen und biographischen Informationen. Dementsprechend beschreiben mehrere EEG-Untersuchungen ein verstärktes LPP beim Betrachten von Gesichtern des Partners [71-73], der eigenen Eltern [74, 75] und der eigenen Kinder [76, 77] ohne Effekt auf frühe, gesichterspezifische ERP-Komponenten. Aufgrund der in diesen Studien lang anhaltenden Signale wurden die gemessenen ERP-Komponenten hier als LPP bezeichnet und damit von P3-Komponenten abgegrenzt. Einige Untersuchungen berichten darüber hinaus eine Korrelation der

elektrophysiologischen Daten mit psychophysischen Markern wie Hautwiderstand, Herzfrequenz und Aktivität der mimischen Muskulatur als Hinweis auf die emotionale Dimension der gemessenen Reaktion (dieser Aspekt wird zusammenfassend diskutiert bei [75]). Im Versuch einer integrativen Betrachtung der verfügbaren Arbeiten kommen Guerra et al. zum Schluss, dass die Interpretation dieser Daten aufgrund der verschiedenen Determinanten später ERP-Komponenten zwar erschwert ist und letztlich kognitive Prozesse (Aufmerksamkeit, Gedächtnis), besondere Stimuluseigenschaften (wie Familiarität und Attraktivität) und emotionales *arousal* sowie die einzigartige soziale und emotionale Bedeutung, die Gesichter von geliebten Personen signalisieren, konvergieren; außerdem wird auf die in mittlerweile mehreren Untersuchungen sehr konsistenten Ergebnisse hingewiesen [75]. Für die Annahme, dass sowohl automatische, aufgaben- ebenso wie inhaltspezifische Prozesse (*task-related* und *content-related*) Korrelat der verstärkten LPP-Aktivität sind, sprechen auch die Untersuchungen von Langeslag et al. [78], die eben solche mittels eines Oddball-Paradigmas differenzieren konnten, und von Grasso et al. [74], in der eine Korrelation des LPP beim Betrachten der Gesichter der eigenen Eltern mit dem psychometrisch erfassten Maß der Beziehung gezeigt werden konnte.

Während zu diesen späten und lang andauernden Signalen während visueller Verarbeitung emotionaler Stimuli zahlreiche EEG-Studien durchgeführt werden, liegen lediglich zwei MEG-Studien, beide aus dem Jahr 2011, vor, die ein neuromagnetisches Äquivalent des LPP zeigen: So von Wessing et al. für die Präsentation positiv-emotionaler Bilder im Vergleich zu neutralen Bildern bei 8-10jährigen Kindern (als LPP-m bezeichnet, [79]) und von Moratti et al. für positiv- und negativ-emotionale Stimuli im Kontrast zu neutralen (als mLPP bezeichnet [67]). Auf die aus physikalischen Prinzipien resultierende Korrelation zwischen EEG- und MEG-Signalen wird nochmals im Methodenteil im Abschnitt 4.2.1 eingegangen. In Abbildung 5 sind das LPP sowie Ergebnisse einer der beiden existenten MEG-Arbeiten zum magnetischen Äquivalent des LPP (LPP-m/mLPP) illustriert. Nachfolgend wird für das magnetische Homolog des LPP die Abkürzung mLPP [67] verwendet.

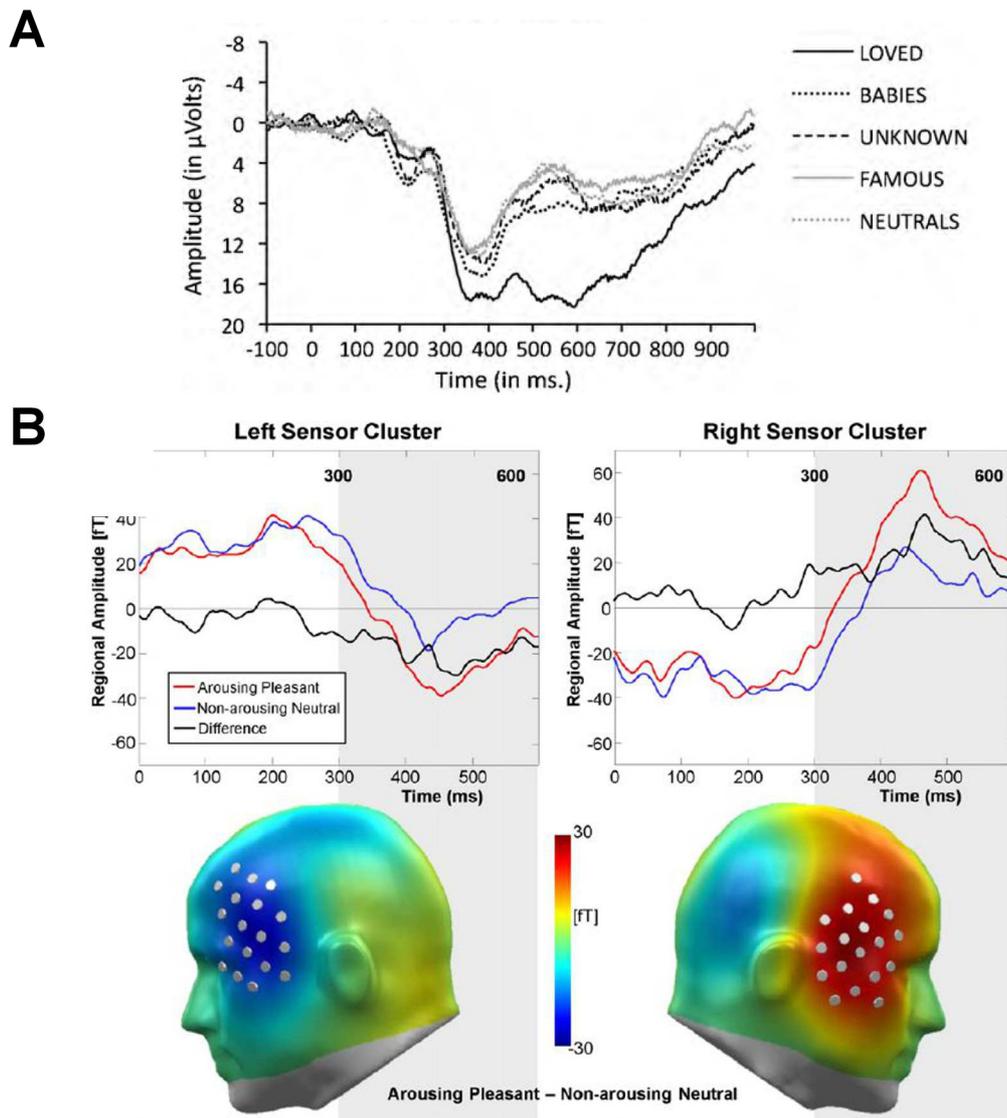


Abbildung 5: Late Positive Potential (LPP) und magnetisches Äquivalent (mLPP/LPP-m)

A) ERPs in Reaktion auf die Präsentation unterschiedlich emotional und sozial relevanter Gesichter (Partner, Babies, Unbekannte, Neutrals, Berühmtheit) mit verstärktem *late positive potential* (LPP) beim Betrachten des Partners (durchgezogene Linie; dargestellt ist als Ausschnitt nur die Pz-Elektrode); aus [73].
 B) Magnetisches Äquivalent des *late positive potentials* (hier als LPP-m bezeichnet) in Reaktion auf positive verglichen mit neutralen Stimuli (*arousing pleasant/non-arousing neutral*) bei 8-10jährigen Kindern aus [79] Darunter die links negative und rechts positive Ausbreitung des magnetischen Feldes in fronto-parietalen Sensorenclustern.

Da die späten ERP-Komponenten P3b und LPP nicht einen singulären neuronalen Prozess abbilden, können die zugrunde liegenden neuronalen Generatoren nicht eindeutig lokalisiert, bzw. nicht auf eine einzelne Struktur begrenzt werden. Aus einer Lokalisierungsstudie von Volpe et al. ergeben sich für die P3b-Komponente im Gegensatz zur mehr frontal lokalisierten

Quelle der P3a mehrere Quellen in bilateralen frontalen, parietalen, limbischen, zingulären und temporo-okzipitalen Regionen [57]. Die Quellen des länger anhaltenden LPP für visuelle, emotionale Stimuli liegen nach Korrelation von fMRT und EEG-Daten im lateralen okzipitalen, inferotemporalen und parietalen Kortex [80]. Basierend auf einer MEG-Untersuchung besteht für das LPP darüber hinaus eine bidirektionale, funktionale Konnektivität zwischen Quellen im (bilateralen) okzipito-parietalen und (rechten) präfrontalen Kortex im Sinne sowohl einer *bottom-up* als auch *top-down* Modulation [67].

2.2.3 Imagination als intern generierter Wahrnehmungsprozess

Die vorliegenden Studien zur Gesichterverarbeitung im spezifischen Kontext der Bindung unterscheiden sich mitunter stark in der Methodik; die meisten ERP-Studien messen die Aktivität beim passiven Betrachten von Photographien unterschiedlich kategorisierter Gesichter (Freunde, Partner, Familienangehörige, eigenes Kind) [71-73, 76] oder verwenden Aufgaben, in denen bestimmte Aspekte wie der emotionale Ausdruck des Gesichts evaluiert werden sollten [77]. Weitere Untersuchungen verwendeten Bilder der Gesichter des eigenen Kindes [74] oder des Partners [78] als Target-stimuli in einem Oddball-Paradigma. In Kontrast dazu umfasst die Aufgabenstellung in den meisten Studien mittels funktioneller Bildgebung zum Thema eine Kombination aus Betrachten des Bildes und einem eher abstrakten Denken an die betreffende Person [81-83] oder mehr noch dem Aufrufen, bzw. Imagination einer emotionalen Situation mit der entsprechenden Person [84-86]. Imagination spielt für emotionales Erleben eine wesentliche Rolle [87], entsprechend wird die Kombination aus Betrachten der Person und Aufrufen einer emotionalen, nicht primär sexuellen Situation von Aron et al. [85] als die beste Strategie beurteilt, um entsprechende Emotionen, die mit der Beziehung assoziiert sind, zu evozieren.

Bei diesen letztgenannten Studien finden also parallel Wahrnehmung und Verarbeitung der präsentierten Gesichter und Visualisierung, bzw. Imagination unterschiedlicher Szenen statt. Das imaginäre Aufrufen von Objekten [88] oder Gesichtern [89, 90] involviert die gleichen Hirnareale (u. a. Gyrus fusiformis) wie der tatsächliche Wahrnehmungsprozess; ebenso ruft emotionale Imagination von appetitiven oder aversiven Inhalten Aktivität in subkortikalen Belohnungsarealen und Amygdala hervor [91]. In welchem Ausmaß allerdings Wahrnehmung und Imagination geteilte oder doch distinkte neuronale Prozesse sind, ist Gegenstand kontroverser Diskussion [92]. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Wahrnehmung und Imagination ist jedenfalls, dass anders als bei Wahrnehmungsprozessen die neuronale Aktivität

bei Imagination nicht durch den sensorischen Input, sondern intern generiert wird; vermutlich maßgeblich in frontalen Strukturen im Sinne einer *top-down* Modulation [89, 90, 93].

Auf elektrophysiologischer Ebene ist Imagination nicht leicht zu untersuchen, da Vorstellung anders als Wahrnehmung im Rahmen eines Experiments schwer ereigniskorreliert werden kann und durch einen variablen Zeitverlauf die Signale durch Mittelwertbildung mehrerer Epochen verschwinden würden. Dennoch konnte in einer entsprechend konstruierten Untersuchungen gezeigt werden, dass Wahrnehmung und Visualisieren einfacher Muster auch eine ähnliche elektrophysiologische Signatur haben, wobei das mit der Imagination korrelierende Signal bereits früher als das der Wahrnehmung entsprechende auftrat [94]. Visualisieren oder Imagination kann darüber hinaus einen darauf folgenden Wahrnehmungsprozeß ähnlich einer „Bahnung“ verstärken [95]. Dies trifft auch auf die emotionale Qualität visueller Stimuli zu, deren Wahrnehmung durch Imagination im Sinne einer Antizipation beeinflusst wird [96]. Der Imagination, bzw. Visualisieren ähnliche neuronale Prozesse laufen eventuell auch selbstständig parallel zur Wahrnehmung und Verarbeitung visuellen Materials ab, indem bereits früh im Verarbeitungsprozess durch einen sog. prädiktiven Code, der auf einer im frühen Verarbeitungsstadium gebildeten, rohen perzeptuellen Repräsentation beruht, durch *top-down* Prozesse der weiterlaufende Wahrnehmungsprozess z.B. durch Abruf kontextueller Information beeinflusst wird [97, 98]. Neben frontalen Arealen spielen hier v. a. der parahippocampale Kortex und das Splenium eine wesentliche Rolle [99]. Demnach wäre die Wahrnehmung von Gesichtern oder Objekten am Ende dieses Vorgangs letztlich ein Konstrukt aus Perzeption und parallel ablaufender Visualisierung mittels Abruf kontextueller und semantischer Information. Eine frühzeitige Verknüpfung des sensorischen Inputs mit einer solchen Art Prädiktion im Ablauf der visuellen Verarbeitung könnte besonders für affektive Inhalte relevant sein [100].

Es gibt aufgrund der benannten methodischen Schwierigkeiten keine verfügbaren Daten zum Einfluss von Imagination auf späte ERP-Komponenten; angesichts des im Abschnitt 2.2.2 zusammengefassten Kenntnisstandes zum kognitiven Einfluss auf die Ausprägung später ERP-Komponenten wie dem LPP [62-65] ist zumindest vorstellbar, dass durch bewusst initiierte Imagination parallel zur Wahrnehmung emotionaler Stimuli die elektrophysiologischen Korrelate ihrer Verarbeitung ebenfalls beeinflusst werden können. Die Theorie von Barrett und Bar [100] legt jedenfalls nahe, dass während der visuellen Wahrnehmung die affektive Relevanz des Gesehenen bereits von Anfang an präsent ist und den Prozess der Verarbeitung bereits frühzeitig bestimmt: „...*affective responses support vision from the very moment that visual stimulation begins.*“, [100], Seite 1.

2.2.4 Limbische und mit Belohnung (Reward) assoziierte Hirnstrukturen

Bartels und Zeki [81, 82] und Aron [85] beschreiben während des Betrachten des Gesichts des Partners eine differenzierte Aktivierung limbischer Hirnstrukturen und Deaktivierungen in Arealen, die als Netzwerke für sog. Soziale Kognition gelten [11] und in die kognitive und emotionale Verarbeitung visueller Stimuli involviert sind. Limbische Hirnstrukturen [101] sind phylogenetisch alt und mit zum Teil unbewussten, emotionalen Prozessen assoziiert, ein Konzept, das auch kontrovers diskutiert wird [102]. Die stärkere Aktivität in Reaktion auf das Gesicht des Partners umfasste subkortikale Strukturen, die zum sog. Belohnungssystem gezählt werden, nämlich das Striatum (Globus pallidus, Putamen, Nucleus Caudatus), subthalamische Region und Substantia Nigra. Unter den Hirnstrukturen, die deaktiviert wurden waren Strukturen wie die Amygdala, das posteriore Zingulum und Anteile des präfrontalen, parietalen und temporalen Kortex; diese werden zum Teil mit negativen Emotionen, kritischer Evaluation des Verhaltens anderer und komplexen kognitiven Prozessen wie *mentalizing* oder *theory of mind* [31] assoziiert (weiteres zu diesem Thema unter 2.2.5).

Das Belohnungssystem umfasst diverse untereinander verschaltete subkortikale und kortikale Strukturen, die Neuronen enthalten, die direkt durch Belohnungsreize wie Essen und Trinken [103] oder Drogen [104] sowie indirekt bei der Antizipation einer wahrscheinlichen Belohnung aktiviert werden [105]. Dieses Belohnungssystem ist die Grundlage von Lern- und Entscheidungsprozessen und eng verknüpft mit motivationalen und emotionalen Prozessen [106]. Auch soziale Reize wie das Sehen attraktiver Gesichter [107-109] oder Kooperation mit anderen [110] produzieren als Ereignisse mit positiver Salienz neuronale Aktivität im Belohnungssystem. Eine prominente Rolle für die Attribution des Belohnungswerts spielt der Orbitofrontalkortex, eine Struktur, wo diverse sensorische Modalitäten konvergieren [111] und die mitunter Grundlage komplexer Lern- und Entscheidungsprozesse ist [112]. Während die subkortikalen Anteile des Belohnungssystems vor allem auf die zunehmende Intensität des Belohnungsreizes ansprechen, korreliert die Aktivität des Orbitofrontalkortex mit dem spezifischen Belohnungswert eines Sinnesreizes [113]. Als polymodale Struktur integriert der Orbitofrontalkortex sensorische Informationen mit dem motivationalen Zustand des Individuums [103, 111]. In Bezug auf die Neurobiologie menschlichen sexuellen Erlebens und Verhaltens hat das Belohnungssystem wesentliche Bedeutung. Dafür sprechen Studien, die starke Aktivität in subkortikalen Belohnungszentren beim Betrachten erotischer Bilder [114] und während sexueller Erregung und Orgasmus [115] zeigten. Auch starke Bindungen, syndyastische [81, 83-86] und Mutter-Kind Bindungen [82, 116] basieren mitunter auf der Funktion des Belohnungssystems.

Die Verknüpfung mit belohnungsassoziierten Hirnstrukturen reflektiert den hohen motivationalen Wert, den jede Dimension menschlicher Sexualität besitzt. Die Aktivität des Belohnungssystems korreliert außerdem mit der subjektiven affektiven Erfahrung [116, 117], der sog. „*hedonic experience*“ [113].

Eine weitere interessante limbische Struktur, die an affektiven Prozessen beteiligt ist und von der in Studien zur Neurobiologie menschlicher Bindung berichtet wird [81-85], ist die Inselrinde (Insula). Die Inselrinde ist eine zytoarchitektonisch und funktionell heterogene Hirnstruktur, die mit viszeralen, sensorischen, motorischen und emotionalen Prozessen verknüpft ist [118], spezifisch mit der Empfindung von Ekel [119]. Darüber hinaus scheint die Inselrinde nicht nur aversive Reize zu prozessieren, sondern für die Verarbeitung somatosensorischer Reize die Funktion eines Assoziationskortex zu besitzen. In der Inselrinde wird dabei anscheinend die angenehme Qualität einer Berührung kodiert [120]. Beschrieben wurde auch die Aktivierung durch als angenehm empfundenes, Gänsehaut produzierendes Streicheln [121] und sexuelle Stimulation [115]. Dementsprechend wird die Inselrinde auch als „*limbischer Integrationskortex*“ [118] bezeichnet, der durch vielfältige anatomische Konnektivität diverse sensorische, viszerale und autonome Einflüsse verarbeitet. Die Inselrinde spielt außerdem mit sekundär somatosensorischen Arealen eine besondere Rolle bei der subjektiven Wahrnehmung von Emotionen [122]. In diesem Konzept fungieren die mit emotionalen Zuständen verbundenen Körperwahrnehmungen als „*somatische Marker*“ [123] der entsprechenden Emotion. Die Verarbeitung viszeraler, interozeptiver Informationen erfüllt auf diese Weise Funktionen für die Selbstwahrnehmung und subjektive, bewusste Erfahrung von Emotionen [124]. Diese emotionalen Funktionen der Inselrinde sind teilweise verknüpft mit der des anterioren Zingulums [122], einer ebenfalls dem limbischen System zugeordneten Struktur [101]. Das anteriore Zingulum besitzt sowohl mit kognitiven als auch emotionalen Prozessen assoziierte Subdivisionen [125] und ist mit diversen Hirnstrukturen reziprok verschaltet, darunter auch der Inselrinde [118]. Das anteriore Zingulum scheint auch an der Bewertung emotionaler Reize beteiligt zu sein und eine Rolle für erhöhte Aufmerksamkeit [125] und *top-down* Kontrolle anderer Hirnstrukturen zu spielen [66]. Das anteriore Zingulum und benachbarte frontale Areale und Inselrinde sind darüber hinaus beteiligt an kognitiver und empathischer Interpretation sozialer Signale [30-32].

2.2.5 Soziale Kognition: Amygdala, Theory of Mind, Empathie

Ein interessanter Aspekt der Arbeiten von Bartels und Zeki sowie Aron et al. [81, 82, 85] ist die Beobachtung einer Deaktivierung der Amygdala. Die Amygdala ist eine subkortikale, temporale Struktur mit komplexer Konnektivität und interner neuronaler Verschaltung [126], die eine zentrale Struktur bei Lernvorgängen wie der sog. Angstkonditionierung ist [102]. Dabei greifen Lernprozesse unterschiedlicher Komplexität auf die Amygdala zurück, unabhängig davon ob ein aversiver Reiz selbst erlebt oder bei anderen beobachtet und durch soziales Lernen als aversiv verknüpft wird [127]. Der Amygdala-Komplex vermittelt über Projektionen in den Hypothalamus und Hirnstamm autonome Reaktionen auf aversive Reize [102, 126] und ist dadurch wahrscheinlich auch an der subjektiven Empfindung von Angst beteiligt [11, 119].

Der Amygdala wird eine Evaluationsfunktion für alle möglichen sensorischen Informationen zugeschrieben, um mögliche Gefahren zu detektieren [128, 129]. In Bildgebungsstudien wird spezifische Aktivität der Amygdala vor allem bei Präsentation emotionaler Gesichter beobachtet [130]. Dysfunktionen dieser Prozesse werden als neurale Grundlage von diversen psychiatrischen Störungen, darunter Angst- und Panikstörungen vermutet [131]. Läsionen der Amygdala beeinträchtigen die Erkennung von emotionalen Expressionen und die Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit anderer [132] und produzieren in Primaten hypersoziales und weniger ängstliches Verhalten [128].

Die präfrontalen, temporalen und parietalen Strukturen, die ebenfalls durch syndyastische Stimuli und damit assoziierten Emotionen deaktiviert wurden, sind Teile eines Netzwerkes, das u. a. komplexe soziale Reize verarbeitet. Medialer Präfrontalkortex, die Temporalpole sowie temporo-parietale Areale sind die neuronale Grundlage des sog. *mentalizing* (auch als *theory of mind* bezeichnet), womit die Fähigkeit bezeichnet wird, Rückschlüsse auf die Intentionen und mentalen Zustände anderer zu ziehen [31]. Temporo-parietale, präfrontale Areale und das Posteriore Zingulum sind außerdem mit moralischer Beurteilung [133], Kontrolle über eigene Emotionen [66] und der Evaluation von Gesichtern [29, 134] assoziiert. Neben der kognitiven Verarbeitung sozialer Interaktionen spielt auch die emotionale, bzw. empathische Fähigkeit eine wesentliche Rolle. Während die Konzepte *theory of mind* und Empathie in einigen Studien als distinkte kognitive und emotionale Facetten sozialer Wahrnehmung erscheinen, ist es wahrscheinlich, dass ihre neuronalen Korrelate zumindest teilweise überlappen [135]. Die in einigen Studien zur Paarbeziehung beschriebenen Aktivierungen im anterioren Zingulum, Inselrinde, frontalen und temporalen Kortexarealen [81, 82, 85] entsprechen teilweise denen, die

auch in empathische Prozesse involviert sind [32]. Möglicherweise sind an diesen Prozessen auch die sog. Spiegelneurone, zu denen zahlreiche Spekulationen existieren, beteiligt: Spiegelneurone wurden zunächst im frontalen prämotorischen Kortex beschrieben und sind sowohl bei der aktiven Durchführung einer Bewegung als auch beim passiven Beobachten derselben bei anderen Personen aktiv [136]. Ein entsprechender Mechanismus wurde für die Verarbeitung und Empfindung von Schmerz [137] und Ekel [138] beschrieben. Dieser Mechanismus könnte neuronale Grundlage sowohl kognitiver als auch empathischer Wahrnehmungen sowie neuropsychiatrischer Defizite bei Autismus sein [30, 139].

Die Aktivierung von mit positiven Emotion und Empathie assoziierten Strukturen beim Betrachten des Gesichtes des Partners reflektiert Empfindungen von Nähe und Vertrauen, die spezifisch für syndyastische Bindungen sind. Der geringere Bedarf an kritischer, sozialer Evaluation und die konsequente Deaktivierung von Teilen des sozialen Netzwerkes geht zum Teil auf einen höheren Grad an Familiarität des vertrauten Gesichtes zurück [14]. Die Deaktivierung der Amygdala scheint dafür ein zentraler Vorgang zu sein und könnte mit der Entstehung gegenseitigen Vertrauens assoziiert sein. Vertrauen und vertrauensvolles Verhalten wird wiederum durch neuroendokrine Faktoren moduliert [140] und Ort dieser Effekte ist möglicherweise die Amygdala: Mehrere Studien beschreiben eine nach Applikation des hypothalamischen Neuropeptids Oxytocin reduzierte Reaktivität der Amygdala auf die Präsentation emotionaler Gesichter [141, 142]. Diese Befunde verweisen auf Ergebnisse zur neuroendokrinen Regulation soziosexueller Verhaltensweisen, die zum Großteil aus tierexperimenteller Forschung stammen. Da die Ergebnisse dieser Studien wesentlich die Vorstellungen zur Neurobiologie von Bindungen geprägt haben, sollen sie nachfolgend kurz referiert werden.

2.2.6 Die neuroendokrine Regulation soziosexueller Verhaltensweisen

Die Ergebnisse zu neuroendokrinen Regulationsvorgängen basieren vor allem auf Experimenten mit „*sozial monogamen*“ [143] Wühlmausspezies, die als Tiermodell der Monogamie bezeichnet wird [144]. Soziosexuelle Verhaltensunterschiede zwischen den einzelnen Spezies sind in der unterschiedlichen zerebralen Verteilung von Neuropeptid-Rezeptoren für Oxytocin und Vasopressin reflektiert [145]. Oxytocin und Vasopressin sind an der Regulation sozialer Lernvorgänge beteiligt [146] und interagieren mit Transmittersystemen, die bei Belohnungsvorgängen eine Rolle spielen und so motivationales Verhalten steuern, insbesondere Dopamin [147]. Anatomische Lokalisation dieser Prozesse sind insbesondere Amygdala [148]

und Nucleus accumbens [147]. Paarung und Geburt triggern über Neuropeptid-Ausschüttung und Aktivierung von Belohnungszentren spezifisches Bindungsverhalten [145] und liefern außerdem den notwendigen endokrinen Kontext dazu, indem Neuropeptide und Sexualhormone auf Rezeptorebene interagieren [149].

Bei zunehmend komplexer sozialer Organisation und fortschreitender Evolution des (frontalen) Neokortex [111] können diese Ergebnisse nicht direkt auf den Menschen übertragen und ähnlich eindeutige Verhaltenseffekte erwartet werden [145]. Die Struktur der beteiligten Neuropeptide ist allerdings spezieübergreifend sehr ähnlich, also hochkonserviert [150]; das bedeutet, dass sich das zugrunde liegende Gen im Lauf der Evolution sehr wenig verändert hat, was auf eine hohe Bedeutung des jeweiligen Gens für das Überleben der Art deutet. Beim Menschen werden Oxytocin und Vasopressin während sexueller Erregung und Orgasmus [151] sowie Geburt und beim Stillvorgang ausgeschüttet [152]. Dabei sind die peripheren und zentralnervösen Effekte wahrscheinlich völlig unterschiedlich und hängen von Rezeptorstruktur und -verteilung und nicht von der Peptidstruktur ab [152]. Im menschlichen Gehirn finden sich Vasopressin- und Oxytocinrezeptoren in limbischen Strukturen wie lateralem Septum, Thalamus, Brocaband, Pallidum, Hippocampus, in Anteilen des Amygdaloidkomplexes und im Hypothalamus, speziell der mit sexuellen Funktionen assoziierten [153] präoptischen Region [154]. Oxytocin hat beim Menschen experimentell nachgewiesene prosoziale Effekte [140], deren neuroanatomische Lokalisation die Amygdala sein könnte. Intranasal appliziertes Oxytocin reduzierte die Amygdalaaktivität in Reaktion auf Gesichter [141, 142], vor allem wenn der Blick direkt auf den Betrachter gerichtet war [142]. Auch die autonome Reaktion auf angstassoziierte Reize, die über Projektionen der Amygdala in den Hirnstamm vermittelt wird [126] war nach Applikation von Oxytocin reduziert [141, 142].

Weitere Hypothesen zu neuroendokrinen Prozessen beim Menschen betreffen lang anhaltende Effekte traumatischer frühkindlicher Erfahrungen, die möglicherweise persistente Veränderungen der Neuropeptidsysteme verursachen [155]. In Tierversuchen wurden lebenslange Verhaltenseffekte durch neuropeptid- und sexualhormonabhängige Prozesse in Abhängigkeit von frühkindlichen Interaktionen beschrieben [156]. Diese Daten verweisen interessanterweise auf die bereits dargestellten Hypothesen der Bindungstheorie über den Zusammenhang zwischen frühkindlichen Erfahrungen und Bindung [2, 4].

3 Fragestellung

Aus dem dargelegten Stand der Forschung lassen sich Implikationen für das experimentelle Paradigma sowie inhaltlich begründete Hypothesen ableiten. Als neuer Ansatz soll in dieser Untersuchung mittels Magnetenzephalographie (MEG) die Präsentation von Gesichtern unterschiedlicher sozialer und emotionaler Bedeutung mit emotionaler Imagination verknüpft werden. Ein ähnlicher Ansatz wurde in einigen Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren verfolgt; die Studien mit elektrophysiologischen Methoden sind dagegen meist auf reines Betrachten beschränkt.

Aus den verfügbaren Daten über den zeitlichen Ablauf sowohl perzeptueller als auch daran anschließende kognitiver und emotionaler Prozesse lassen sich folgende Hypothesen formulieren: 1) Der Unterschied zwischen den präsentierten Gesichtern beeinflusst nicht die frühen und gesichterspezifischen Signale mit einer Latenz < 200 ms, die aus der MEG-Literatur bekannt sind, 2) Ein Unterschied zwischen den Stimuluskategorien wird erst für Signale mittlerer (200-300 ms) und langer Latenz (> 300 ms) erwartet, die in zahlreichen ERP-Studien zwischen emotionalen und neutralen Reizen differenzierten, 3) diese erwarteten Signale stellen das magnetische Äquivalent des elektrischen *late positive potential* dar, die Ausbreitung des magnetischen Dipols lässt sich dementsprechend auf die regionale Ausrichtung des elektrischen Dipols in den EEG-Arbeiten beziehen.

4 Material und Methoden

Mit dieser Studie wurde die Hirnaktivität gesunder Probanden in Reaktion auf die Präsentation von Gesichtern ihrer Partner im Vergleich zur Reaktion auf Gesichter befreundeter Personen untersucht. Zu diesem Zweck wurde erstmalig die Magnetenzephalographie genutzt, um neuromagnetische Korrelate evaluativer und affektiver Prozesse im menschlichen Bindungserleben und -verhalten zu beschreiben. Neben der elektrophysiologischen Messung fand eine testpsychologische Untersuchung unter Verwendung von Fragebögen statt, die relevante Informationen über das Beziehungserleben und -verhalten der Probanden liefert und außerdem als Screeningverfahren für Störungen im Bereich der Sexualität fungiert.

Die Untersuchung fand im Rahmen einer Zusammenarbeit des Instituts für Sexualwissenschaft und Sexualmedizin der Charité mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Berlin statt. Vor Durchführung der Studie wurde die Zustimmung der zuständigen Ethikkommission eingeholt. Jeder Proband erhielt vor der Untersuchung mündlich und schriftlich ausführliche Informationen über das Experiment und erklärte schriftlich sein Einverständnis. Die Versuchspersonen wurden für die Teilnahme bezahlt. Alle Daten wurden anonym unter Verwendung eines Zahlencode gespeichert und weiterverarbeitet.

4.1 Auswahl der Probanden

Es wurden über Aushänge an den Campi der Berliner Universitäten Paare im Alter zwischen 18 und 45 Jahren gesucht, die seit mindestens 1 Jahr zusammen und nach eigener Aussage glücklich mit ihrer Beziehung sind. Durch ein standardisiertes telefonisches Interview mit jedem Probanden wurden eventuelle Störfaktoren ausgeschlossen. Ausschlusskriterien waren a priori psychiatrische oder neurologische Erkrankungen aktuell oder in der Vorgeschichte, die Einnahme zentralnervös wirksamer Medikamente oder Drogen und das Tragen nicht abnehmbarer metallischer Schmuckstücke oder Implantate. Brillenträger konnten teilnehmen, sofern sie zur Messung Kontaktlinsen einsetzten und mit Korrektur einen normalen Visus hatten.

4.2 **Magnetenzephalographie (MEG)**

Mittels MEG können auf nicht-invasive Weise magnetische Felder gemessen werden, die durch Aktivität in Verbänden von Nervenzellen entstehen. Nachfolgend sollen physiologische und physikalische Grundlagen sowie die notwendigen technischen Voraussetzungen der MEG dargestellt werden.

4.2.1 **Physiologische und Physikalische Grundlagen**

Grundlage der Informationsübermittlung im zentralen Nervensystem sind elektrochemische Prozesse, welche sich innerhalb und zwischen Neuronen abspielen. Depolarisationen und anschließende Repolarisation an der Zellmembran rufen Stromflüsse innerhalb eines Neurons, den sog. *primary current* oder *source current*, und einen Ausgleichsstrom außerhalb der Zelle hervor, den sog. *secondary current* oder *volume current* [157]. Die korrespondierenden Potentialänderungen können durch Stromdipole mit unterschiedlicher Stärke, Position und Ausrichtung charakterisiert werden und mittels Elektroden an der Kopfoberfläche als EEG aufgezeichnet werden. Das EEG ist dabei besonders sensitiv für zur Kopfoberfläche radial orientierte Stromdipole, weil diese einen tangential gerichteten Ausgleichsstrom produzieren, der mit den Elektroden gut erfasst wird (Abbildung 6 und Abbildung 7). Jeder elektrische Dipol produziert ein dazu rechtwinklig orientiertes magnetisches Feld; dies wird durch die sog. Rechte-Hand-Regel nach Fleming veranschaulicht, in der der ausgestreckte Daumen die Richtung des Stromflusses markiert und entsprechend der rechtwinklig zum Daumen ausgestreckte Zeigefinger die Richtung der Magnetfeldlinien anzeigt. In Bezug auf die MEG bedeutet dies, dass ein zur Kopfoberfläche radial gelegener Stromdipol (durch kortikale Aktivität an einem Gyrus) ein außerhalb des Kopfes nicht messbares Magnetfeld produziert. Ein dagegen durch neuronale Aktivität in einem Sulcus hervorgerufener und damit tangential zur Kopfoberfläche liegender elektrischer Dipol ruft ein sich außerhalb des Kopfes ausbreitendes Magnetfeld hervor, welches durch MEG erfasst wird (Abbildung 6). Während das Signal des EEG vor allem die extrazellulären Ausgleichsströme des *volume current* abbildet, basieren die tangential zur Kopfoberfläche orientierten Dipole damit vor allem auf den intrazellulären Stromflüssen des weiter oben beschriebenen *source current* in fissuralen kortikalen Neuronen, den Pyramidenzellen (Abbildung 6). Die MEG ist also in der Lage, kortikale und besonders in den Sulci gelegenen Quellen aufzuzeichnen und ist weniger sensitiv für Dipole in den Gyri sowie tiefer gelegene, subkortikale Quellen [158].

Ein mittels MEG detektierbares Magnetfeld beruht auf simultaner Aktivität von Neuronenpopulationen mit schätzungsweise 10^4 bis 10^5 Zellen. Das zeitliche Auflösungsvermögen der MEG liegt im Millisekundenbereich, die Lokalisierung des zugrunde liegenden magnetischen Dipols ist unter optimalen Bedingungen mit einem Fehler von 2-3 mm möglich [157-159]. Unter realistischen Bedingungen liegt die räumliche Auflösung je nach Amplitude, Lokalisierung und Orientierung des magnetischen Dipols jedoch etwas darunter [159]. Während die Messung elektrischer Potentialänderungen mittels EEG durch unterschiedliche Leitfähigkeiten vom unter den Elektroden liegenden Gewebe (also Haut, Haare, Knochen, Hirnhäute, Gehirn und Liquor, Knochen) stark beeinflusst werden kann, ist die magnetische Permeabilität dieser unterschiedlichen Gewebe untereinander sehr ähnlich, so dass Magnetfelder außerhalb des Kopfes mit geringer Verzerrung messbar sind [159]. Hieraus ergeben sich zusammenfassend sowohl ergänzende als auch komplementäre Eigenschaften von MEG und EEG, die daher häufig simultan eingesetzt werden.

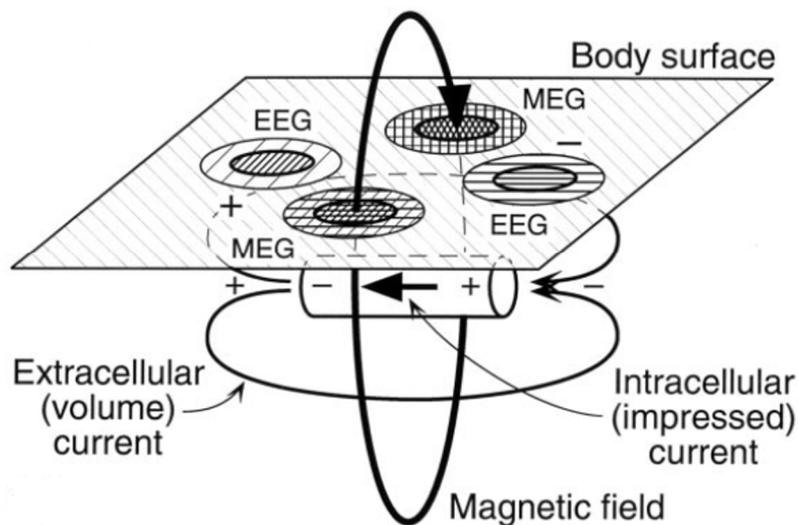


Abbildung 6: Elektrophysiologische Grundlagen von EEG und MEG

Schematisierte Darstellung der elektrophysiologischen Grundlage von EEG und MEG; der extrazelluläre Ausgleichsstrom (*volume current*) produziert maßgeblich das im EEG messbare Signal, während das im MEG gemessene Feld auf intrazellulärem Stromfluss (*source current*, hier alternativ als *impressed current* bezeichnet) basiert. Abbildung aus [157].

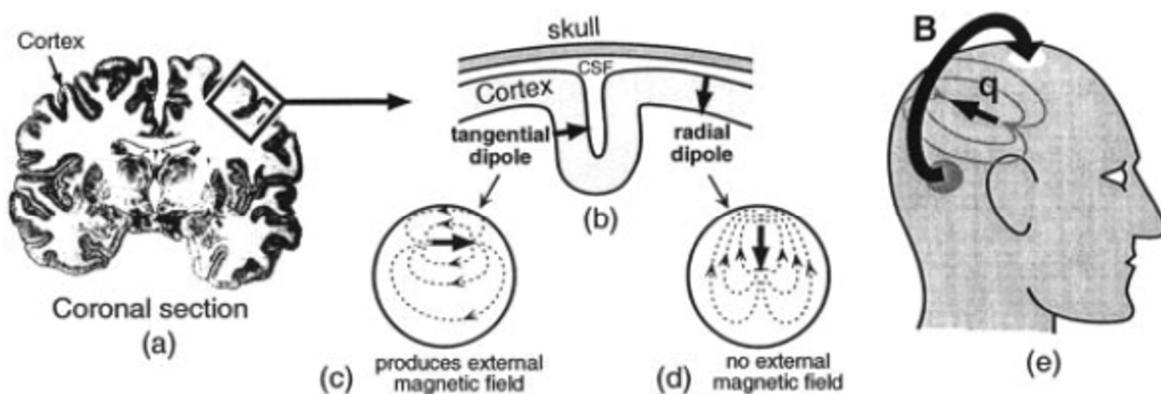


Abbildung 7: Beziehung zwischen Neuroanatomie und EEG und MEG-Signal

In der Mitte (b) ein Ausschnitt aus einem koronaren Schnitt durch das Gehirn (a): Je nach tangentialer oder radialer Orientierung des Dipols entweder in einem Gyrus oder Sulcus des Kortex (b) entsteht ein außen messbares Magnetfeld (c) oder nicht (d); ein tangential gelegener Dipol ist damit hauptsächlich Ursprung eines außerhalb des Kopfes mit MEG detektierbaren Magnetfeldes (e). Abbildung aus [157].

4.2.2 Detektion neuromagnetischer Signale mittels MEG

Neuromagnetische Signale liegen in einer Größenordnung von lediglich 50-500 fT; das geomagnetische Feld der Erde und fluktuierende Magnetfelder durch elektrische Geräte, Straßenbahnen, Radiowellen, etc. verursacht dagegen ein um den Faktor 10^8 bis 10^9 stärkeres Hintergrundrauschen [158]. Um solch schwache magnetische Felder detektieren zu können, werden besondere Sensoren, sog. *superconducting quantum interference devices* (SQUIDs; Abbildung 8), eingesetzt. Ein SQUID ist eine ringförmige Spule aus Metallen, meistens Niob, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt supraleitende Eigenschaften bekommen. Im supraleitenden Zustand liegt der elektrische Widerstand praktisch bei Null, so dass Schwankungen magnetischer Felder durch schwache Stromflüsse mit SQUIDs registriert und ohne Verluste weitergeleitet werden können. Um supraleitende Eigenschaften zu erzeugen, müssen Gradiometer und SQUIDs mit flüssigem Helium in einem Isoliergefäß (dem sog. Dewar) auf eine Temperatur von 4 Kelvin, also ca. -270° Celsius gekühlt werden.

Um das Hintergrundrauschen zu reduzieren werden SQUIDs mit einem ebenfalls supraleitenden sog. Gradiometer gekoppelt. Ein Gradiometer erster Ordnung besteht aus einer Eingangs- und einer Kompensationsspule, die zueinander gegensinnige Windungen haben (Abbildung 8); gemessen und als Output an das SQUID geleitet wird die Differenz eines Magnetfeldes zwischen Eingangsspule und der weiter von der Quelle entfernten Kompensationsspule. Die Feldstärke

nimmt mit zunehmender Entfernung von der Quelle des Signals ab, so dass eine nahegelegene Quelle ein stärkeres Signal in der Eingangsspule als in der Kompensationsspule verursacht und diese Differenz bei schwachen Signalen umso stärker ausgeprägt ist. Weiter entfernte, außerhalb der Messkabine liegende, Quellen dagegen verursachen in Eingangsspule und Kompensationsspule einen nahezu gleichen Input, so dass aufgrund der entgegengesetzt gewundenen Spulen im Gradiometer kein Signal an das SQUID weitergeleitet wird. MEG Messungen finden darüber hinaus in magnetisch abgeschirmten Messkabinen statt. Der Einfluss magnetischer Felder mit Ursprung außerhalb der Messkabine können weiterhin durch zusätzliche technische Verfahren wie z. B. aktive Kompensation vermindert werden. Vor der Messung müssen ferromagnetische Gegenstände (Schmuck, Brillen, etc.) abgelegt werden, um Artefakte zu vermeiden.

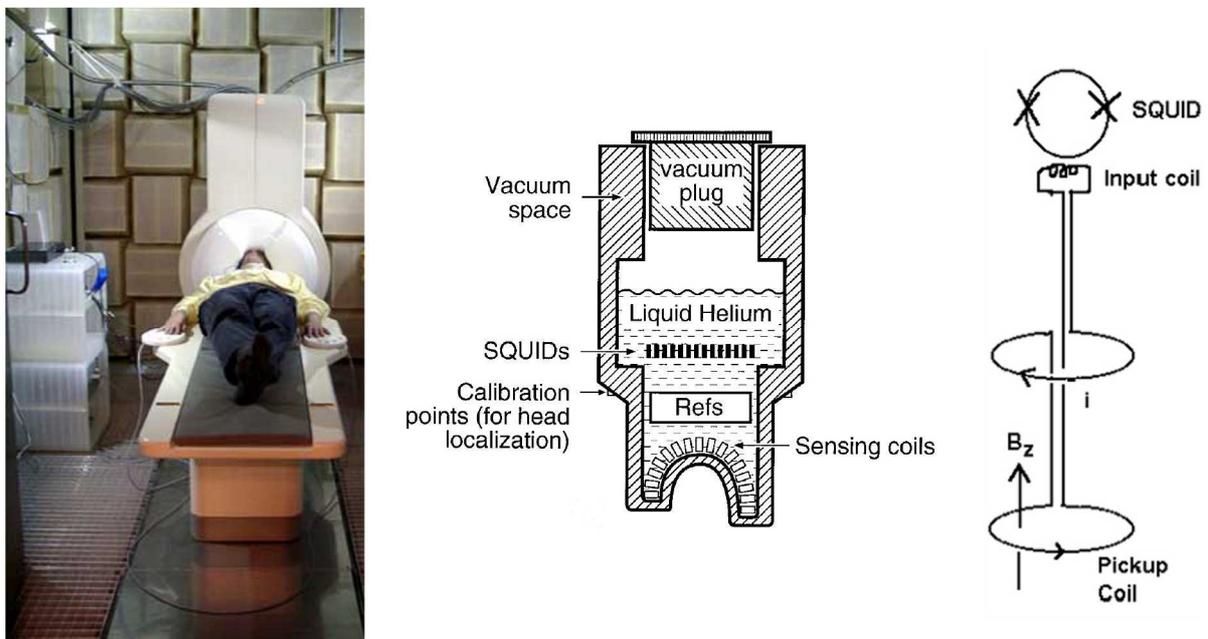


Abbildung 8: Instrumentation der MEG

Links eine Versuchsperson im MEG-Gerät der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Abbildung: PTB); rechts eine Darstellung der Anordnung von Spulen und SQUIDs im sog. Dewar (Isoliergefäß) aus [157]. Ganz rechts die schematische Darstellung eines Gradiometers erster Ordnung mit dazugehörigem SQUID, die Kreuze markieren die sog. Josephson-Kontakte. Der Pfeil kennzeichnet die Richtung des magnetischen Flusses, der in den entgegengesetzt gewundenen Spulen (*pickup coil*) registriert wird (Abbildung der Universität Aston¹).

¹ Quelle: <http://www1.aston.ac.uk/lhs/research/facilities/meg/introduction/sensors/> (24.06.2007)

4.2.3 MEG im Vergleich mit anderen Methoden

Neurale Prozesse werden als spatiotemporale Phänomene charakterisiert, also der Veränderung neuronaler Aktivität in bestimmten Hirnstrukturen in einem ebenfalls bestimmten Zeitintervall. Indem die mittels EEG und MEG aufgezeichneten Signale direkt auf neuronaler Aktivität beruhen kann damit Hirnaktivität in Echtzeit untersucht werden. Die Lokalisierung der diesen Signalen zugrunde liegenden Quellen und damit Identifikation der beteiligten neuroanatomischen Strukturen ist jedoch sehr komplex. Der Zusammenhang zwischen elektromagnetischem Signal und dazugehöriger Quelle ist uneindeutig; dieses sog. Inverse Problem wurde bereits durch Helmholtz beschrieben und erfordert mathematische Modelle, mit denen mögliche Quellenkonfigurationen modelliert werden können [158].

Bildgebende und funktionelle Verfahren wie die funktionelle Kernspintomographie (fMRT) oder Positronen-Emissions-Tomographie (PET) erfassen neuronale Aktivität indirekt über metabolische oder hämodynamische Veränderungen und bieten präzisere anatomische Informationen, können jedoch aufgrund ihrer zeitlichen Trägheit schnell ablaufende neuronale Reaktionen nicht genügend darstellen.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil für die Untersuchung relativ subtiler emotionale Reaktionen wie in dieser Studie sind bei EEG und MEG die fehlende Invasivität der Methoden und die ruhige und private Atmosphäre, im Gegensatz zur Tracerinjektion bei PET und Lärm bei der fMRT Messung.

4.3 MEG-Messung

4.3.1 Das MEG-System der PTB

Die Messungen wurden mit einem 93-SQUID System der Firma Eagle Technology durchgeführt. Bei den Sensoren handelt es sich um axiale Gradiometer erster Ordnung mit einer *baseline* von 5 cm mit dc SQUIDs. Die *baseline* beschreibt als technisches Detail die Entfernung zwischen Gradiometerspule und SQUID. Die Sensoren sind in einem Dewar angeordnet, der den Kopf der liegenden Untersuchungsperson helmförmig umschließt. Über einen Schirm können den Probanden visuelle Stimuli per Projektion präsentiert werden. Das MEG System befindet sich im akustisch und magnetisch abgeschirmten Raum im Helmholtz-Gebäude der PTB in Berlin.

4.3.2 Vorbereitung der Messung und Instruktion der Versuchspersonen

Die Paare erschienen gemeinsam zu einem Messtermin. Nachdem ihnen die Messkabine gezeigt wurde und ausführliche Informationen gegeben wurden, erklärten die Versuchspersonen schriftlich ihr Einverständnis. Getrennt voneinander bearbeitete jede/r Proband/in den FA-SEB. Im Vorraum zur Messkabine legten die Probanden alle metallischen Gegenstände ab und zogen bei Bedarf Versuchskleidung an. An definierten Stellen wurden 5 Markerelektroden zur Bestimmung der Kopfposition im Messsystem befestigt. Unmittelbar vor Beginn des Experiments wurde den Probanden der genaue Ablauf erläutert. Sie wurden aufgefordert, sich zu jedem Foto Szenen vorzustellen, die typische Gefühle von Vertrauen und Verbundenheit beim Bild des Partners, bzw. freundschaftliche Gefühle bei den Bildern der Freunde wachruft. Nach jeder Bildpräsentation sollten die Probanden/innen über die Anzahl von Mausklicks (minimal 1 und maximal 5) mitteilen, ob und in welchem Maße eine emotionale Reaktion ausgeprägt war. Durch diese Aufgabe sollte außerdem ein Übertragungseffekt zwischen den einzelnen Stimuluskategorien minimiert werden. Vor Beginn der eigentlichen Messung wurde zuerst auf Artefakte durch ferromagnetische Gegenstände überprüft und ein Testlauf durchgeführt, um die Probanden mit dem Ablauf vertraut zu machen.

4.3.3 Eigenschaften der Stimuli und Versuchsablauf

Jeder Proband hatte verschiedene Bilder in digitaler Form vom Partner und befreundeten Personen mit dem gleichen Geschlecht wie der Partner mitgebracht, von denen jeweils eines ausgewählt und bearbeitet wurde. Die Fotos wurden vor dem Versuch digital bearbeitet und hatten eine Größe von 100 x 100 Pixel. Der Sehwinkel betrug bei einer Größe in Projektion von ca. 10 cm und einer Entfernung von ca. 30 cm ungefähr $11,5^\circ$. Die Bilder zeigten nur das Gesicht der Person und unterschieden sich nicht zwischen den Stimuluskategorien durch besondere Merkmale der gezeigten Gesichter oder ähnliches. Jedem Probanden wurden insgesamt 3 Bilder von Gesichtern präsentiert, von denen 1 das Gesicht des Partners zeigte („Syndyastisch“ = S) und 2 die Gesichter von Personen, zu denen eine freundschaftliche Beziehung bestand und die das gleiche Geschlecht wie der Partner haben („Freundschaft 1“ = F1; „Freundschaft 2“ = F2). Die 3 verschiedenen Bilder wurden in zufälliger Reihenfolge jeweils 30mal für 6000 ms gezeigt. Nach Ende der Stimuluspräsentation wurde ein Fixationskreuz gezeigt und die Probanden gaben über die Anzahl von Mausklicks ihr Feedback, dann begann nach einem Intervall von 2000 ms

mit Fixationskreuz die nächste Bildpräsentation. Die gesamte MEG-Messung dauerte pro Person im Durchschnitt etwa 30 Minuten.

Vor und nach der MEG-Messung wurde die Position des Kopfes der Versuchsperson im MEG-Gerät gemessen. Zu diesem Zweck wurden fünf Spulen auf der Stirn und neben den Ohren befestigt. Durch diese Spule fließt während der Spulenmessung ein geringer elektrischer Strom, der ein Magnetfeld erzeugt, das von den nahegelegenen Sensoren registriert wird. Die Lage dieser Messkanäle zeigt dann die Position der Spulen im Vergleich zu allen MEG-Sensoren an. Jede Spulenmessung dauerte circa 2 Minuten. Nach der MEG-Messung wurden die Positionen der magnetischen Spulen am Kopf mit einem Ultraschallmessgerät (Firma Zebris) gemessen. Mittels definierter anatomischer Messpunkte (Nasion, präaurikulär rechts und links) wurde ein dreidimensionales Koordinatensystem mit x-, y- und z-Dimension konstruiert. Danach wurde mittels Ultraschall die Position der Markerelektroden in diesem dreidimensionalen Raum gemessen und als digitalisierte Punkte im Koordinatensystem gespeichert. Durch die Bestimmung der Spulenposition am Kopf und im Gerät kann für jeden MEG-Sensor berechnet werden, über welcher Stelle des Kopfes er sich befand.

4.3.4 Experimentsteuerung

Die Stimuluspräsentation wurde durch das Programm *Experimental Run-Time System* (ERTS, BeriSoft Cooperation) gesteuert. Mittels ERTS wurden zuvor Auswahl, Präsentationsabfolge und -dauer programmiert sowie die Zuordnung der Bilder zur entsprechenden Stimuluskategorie kodiert. Für jede Stimuluskategorie (F1, F2, S) wurde eine Triggerkodierung festgelegt, so dass mit Hilfe der in ERTS über einen separaten Kanal aufgezeichneten Triggersignale die MEG-Daten korrekt der entsprechenden Stimuluskategorie zugeordnet werden konnten. Das Triggersignal markierte außerdem Beginn und Ende der Bildpräsentation, damit die Daten gemittelt und ereigniskorrelierte Felder berechnet werden konnten.

4.3.5 Aufzeichnung und Digitalisierung der Messdaten

Die MEG Daten wurden mit einem Hochpassfilter von 0.1 Hertz (Hz), einem Tiefpassfilter von 200 Hz und einer Digitalisierungsrate von 500 Hz gemessen und vom Programm „Meg Laboratory“ aufgezeichnet.

4.4 Analyse der MEG-Daten

4.4.1 Vorverarbeitung und Artefaktbereinigung

In einem nächsten Auswertungsschritt wurden die MEG Daten mit einem Tiefpassfilter von 40 Hz und einem Hochpassfilter von 0.5 Hz nachgefiltert. Durch die elektrische Aktivität des Herzens produzierte sowie systembedingte, technische Artefakte wurden durch die Durchführung einer *independent component analysis* (ICA [160]) bereinigt. Die ICA wurde durch Dipl. Phys. Dr. Joachim Weber durchgeführt. Zur weiteren Auswertung wurden die Daten in das Programm BESA (*Brain Electrical Source Analysis*, MEGIS Software) eingelesen. In BESA wurde (im Modul *artifact scan*) eine Artefaktermittlung durchgeführt und mit Augenbewegungsartefakten kontaminierte Epochen entfernt. Die Daten wurden anschließend für jede Versuchsbedingung über die Trials gemittelt. Diese Mittelung war unabhängig vom während des Experiments gegebenen Rating der Probanden/innen. Mittels Einbeziehung der von ERTS erzeugten Triggersignale konnten Präsentationsbeginn und Ende in BESA berechnet werden. Die in die Auswertung einbezogenen Epochen bestanden aus 300 ms Prästimulusintervall, 6000 ms Bildpräsentation und 2000 ms Poststimulusintervall.

4.4.2 Auswertung von Ereigniskorrelierten Feldern (ERF)

Aufgrund der fokalen Messfähigkeit des MEG im Vergleich zum EEG und der individuell unterschiedlichen Position des Kopfes im Messsystem besteht eine größere Varianz der Daten von Person zu Person. Ein bei allen Versuchspersonen nachweisbares Signal wird also nicht von immer den gleichen MEG Sensoren gemessen. Dies ist ein wesentlicher methodischer Unterschied zur Auswertung Ereigniskorrelierter Potentiale (ERP) in EEG-Studien, die aus Mittelung derselben nach einem definierten System angeordneten EEG-Elektrode über alle Versuchspersonen berechnet werden können. Die Auswertung von Ereigniskorrelierten Feldern (ERF) muss also in höherem Maße individualisiert werden, indem vor der eigentlichen Auswertung für jede/n Probanden/in zunächst Gruppen von Sensoren identifiziert werden müssen, die die fraglichen Signale abbilden.

Die Identifikation solcher Sensorengruppen und die Berechnung von Mittelwerten für definierte Zeitfenster von Interesse wurden mit in *Visual Basic for Applications* (VBA) programmierten Makros für *Microsoft Office Excel*[®] (Version 2003) durchgeführt. VBA ist eine skriptbasierte Programmiersprache, mit der Codes für Prozeduren in Anwendungen wie *Microsoft Office*

Excel[®] oder *Word*[®] geschrieben werden können. Mittels VBA Makros können insbesondere repetitive Analyseschritte für große Datenmengen programmiert werden, um zielgerichtete Analysen automatisiert ablaufen zu lassen. In Bezug auf die Fragestellungen dieser Arbeit wurden zuerst entsprechende Auswertestrategien entwickelt und mit VBA Makros umgesetzt. Ausgewertet wurden die Zeitkurven, also der Verlauf von Änderungen der Feldstärke über die Zeit. Die statistische Auswertung der Ergebnisse wurde mittels SPSS für Windows Version 16.0 durchgeführt.

4.4.2.1 Frühe ERF

Um frühe ereigniskorrelierte Felder (ERF), die mit unterschiedlichen Stadien der Gesichtererkennung assoziiert sind, in Bezug auf Effekte der Versuchsbedingungen zu untersuchen, wurden M100 und M170 untersucht. M100 und M170 treten nach circa 100 und 170 ms auf und reflektieren die Kategorisierung und Identifikation von Gesichtern [23]. Als M100 wurde ein positiver Peak im Zeitbereich zwischen 50-150 ms und Maximum zwischen 70-130 ms nach Stimuluspräsentation definiert, als M170 ein positiver Peak zwischen 100-240 ms mit Maximum zwischen 140-200 ms. Um Sensoren zu identifizieren, die entweder M100 oder M170 abbilden, wurde ein Algorithmus entwickelt, mit dem Feldmaxima im entsprechenden Zeitbereich analysiert wurden. Kriterium war das Vorkommen nur eines deutlichen positiven Peaks, der innerhalb des Zeitfensters beginnt und endet. Aus diesen Kanälen wurde nach maximaler Ausprägung und regionaler Anordnung ein Cluster mit 5 Sensoren ausgewählt, deren Signale gemittelt und als M100 oder M170 ausgewertet wurden. Für M100 und M170 wurden für jede Kondition Amplitude und Peaklatenz berechnet. Als Peaklatenz wurde der Zeitraum definiert, während dem das Signal mindestens 50 % der maximalen Ausprägung hatte.

4.4.2.2 ERF mit mittlerer und langer Latenz

Für die Auswertung des neuromagnetischen Äquivalents des LPP wurde der Zeitbereich zwischen 400-700 ms nach Stimuluspräsentation untersucht [55, 72]. Es wurde ein Algorithmus erarbeitet, mit dem die Sensoren identifiziert wurden, die ein besonders starkes Signal im fraglichen Zeitbereich zeigen, unabhängig davon, ob dieses zwischen den Stimuluskategorien differierte. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden davon zwischen 5 und 10 regional angeordnete Kanäle nach maximaler Ausprägung ausgewählt. Es wurde dann die mittlere magnetische Aktivität für die Zeitfenster 0-200 ms, 200-400 ms, 400-700, 700-1000 ms, 1000-

1500 und 1500-2000 ms und ab 2000 ms in Sekundenschritten (2-3 s, 3-4 s, 4-5 s, 5-6 s) berechnet. Die Auswahl dieser Zeitbereiche orientiert sich am Vorgehen in ERP-Studien zu Signalen in der Verarbeitung affektiver Stimuli [55, 72]. Dieselben Zeitfenster wurden auch für die Kanäle berechnet, die jeweils die M100 und M170 abbilden. In die Auswertung wurden alle Trials einbezogen, nachdem kein Unterschied zwischen den per Mausklicks als mit einer starken oder schwachen subjektiven Reaktion verknüpft bewerteten Trials zu sehen war.

Diese Auswertung basiert auf der Auswahl bestimmter Sensorengruppen in jeder Versuchsperson. Als Auswertemethode wurde zusätzlich die Ausbreitung des magnetischen Feldes mittels *difference maps* dargestellt. Dabei werden 2 Versuchsbedingungen kontrastiert und die resultierende und die eventuell vorhandene Differenz zwischen beiden Konditionen zeigende Feldaktivität auf einem Kopfmodell dargestellt. Neben dem Unterschied zwischen der magnetischen Aktivität verschiedener Versuchsbedingungen liefert diese Methode auch Informationen über die Verteilung der magnetischen Felder. Die *difference maps* wurden mittels BESA erstellt.

4.4.3 Statistische Untersuchung der MEG Ergebnisse

Es wurden Amplitude und Latenz der frühen ERF (M100 und M170) untersucht sowie die über definierte Zeitfenster gemittelte magnetische Aktivität. Die Normalverteilung der Daten wurde mittels Kolmogorov-Smirnov-Test (Signifikanz $p < .05$) berechnet. Die Werte wurden für die gesamte Stichprobe mittels ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innensubjektfaktor Kondition (3 Faktoren: Präsentation des Gesichts des Partners und jeweils 2 befreundeter Personen; Konditionen F1, F2, S) verglichen. Bei Verletzung der Sphärizität wurde eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser angewandt. Post-hoc Vergleiche zwischen einzelnen Stimuluskategorien wurden mittels gepaarten T-Tests durchgeführt. Für die Untersuchung eventueller Geschlechtsunterschiede wurde bei der ANOVA als Zwischensubjektfaktor Geschlecht eingeführt und bei signifikanten Effekten ein Post-hoc Vergleich mittels T-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt. Mögliche Geschlechtereffekte und andere Einflussfaktoren wurden weiterhin mit der zweiseitigen Korrelation nach Spearman und einer multiplen linearen Regression untersucht, das Signifikanzniveau lag auch hier bei $p < .05$. Neben der Auswertung der Zeitkurven wurde die lokale Ausprägung des magnetischen Dipols mit Feldkarten dargestellt. Als Signifikanzniveau wurde $p < .05$ festgelegt, wegen der explorativen Natur dieser Untersuchung wurde auf eine Korrektur des α -Fehlerniveau nach Bonferroni verzichtet. Aufgrund der hohen Anzahl

statistischer Tests beim Post-hoc Vergleich der Zeitfenster wird bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse gesondert auf diesen Aspekt eingegangen.

4.5 *Eingesetzte testpsychologische Verfahren*

Psychologische Testverfahren in der Sexualmedizin wurden entwickelt, um sexuelles Erleben und Verhalten differenziert und umfassend erheben zu können. Sexuelle Störungen können dabei nach aktuellen diagnostischen Manualen wie ICD-10 oder DSM-IV operationalisiert erfasst werden [161, 162]. Die eingesetzten testpsychologischen Verfahren in dieser Studie haben zunächst die Funktion, Informationen über partnerschaftliches Erleben und Verhalten durch standardisierte Instrumente objektivierbar und vergleichbar zu machen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse über die Empfindungen und das Verhalten in der Beziehung ergänzen die in der neurophysiologischen Untersuchung gemessenen Daten.

4.5.1 Fragebogen zum sexuellen Erleben und Verhalten

Der Fragebogen zum sexuellen Erleben und Verhalten, FSEV [163], ist ein standardisiertes Erhebungsinstrument, mit dem sexualwissenschaftlich relevante Informationen zu wesentlichen Bereichen sexuellen Erlebens und Verhaltens [162] erfasst werden können. Der FSEV besteht aus geschlossenen Fragen, die selbstständig bearbeitet werden können, wobei ein Untersucher anwesend sein sollte, um Rückfragen beantworten zu können. Der FSEV bezieht sich auf den Zeitraum der letzten 12 Monate oder erfragt gezielt biographische Aspekte. Mittels modularer Skalen werden Informationen zu sexueller sowie partnerschaftlicher Entwicklung, Einstellung und Verhaltensweisen erhoben [162]. Darüber hinaus werden klinisch relevante Bereiche des FSEV (Sexuelle Funktion, Sexuelle und Geschlechts-Identität, Sexuelle Neigungen) nach den Kriterien des ICD-10, bzw. DSM-IV erfasst. Für die vorliegende Studie wird der FSEV eingesetzt, um relevante Informationen zur aktuellen Partnerschaft erfassen, dokumentieren und auswerten zu können. Darüber hinaus liefert der FSEV Hinweise auf eventuelle Störungen im partnerschaftlichen und sexuellen Erleben und Verhalten und wird zu diesem Zweck als Screeningverfahren eingesetzt.

4.5.2 Fragebogen zum Ausmaß der Syndyastischen Erfüllung in Beziehung

Der Fragebogen zum Ausmaß der Syndyastischen Erfüllung in Beziehungen, FA-SEB [164], zielt auf die Erfüllung syndyastischer Bedürfnisse in unterschiedlichen sozialen Beziehungen ab und „erfasst, in welchem Ausmaß Intimität, Geborgenheit, Akzeptanz, Sicherheit und Vertrauen innerhalb der vergangenen 6 Monate erlebt wurde“ (zitiert aus [161], S.96). In 18 Items werden syndyastische Empfindungen beschrieben (z.B. *Ich fühlte mich geborgen* oder *Ich konnte meine tiefsten Gedanken und Gefühle teilen*). Mittels einer fünfstufigen Skala (1-gar nicht, 5-sehr stark) wird bewertet, in welchem Ausmaß die Versuchsperson diese Empfindung in unterschiedlichen Beziehungstypen realisiert sieht: In der Beziehung zum Partner (Subskala „Partnerschaft“), beim Sex mit dem Partner (Subskala „Sex“), in einer engen Freundschaft (Subskala „Freundschaft“) oder ggf. in der Beziehung zum eigenen Kind (Subskala „Kind“). Die Angaben sollen sich dabei auf die letzten 6 Monate beziehen. Für jede der Subskalen werden Summenscores gebildet. Der FA-SEB liefert damit Informationen über individuelle Unterschiede in der Verwirklichung syndyastischer Grundbedürfnisse in diversen sozialen Beziehungen.

4.5.3 Passionate Love Scale

In der *Passionate Love Scale*, PLS [165], werden 30 Empfindungen beschrieben, die typisch für einen Zustand des Verliebtseins sind (z.B. *Ich wäre zutiefst verzweifelt, wenn ... mich verlassen würde*; in der Freistelle ist gedanklich der Name des/der Partners/in einzufügen), die auf einer 1-9 stufigen Skala bewertet werden soll (1-3 trifft nicht zu, 4-6 trifft zu, 7-9 trifft voll zu, jeweils mit 3 Abstufungen). Aus allen Items wird die Summe berechnet und von einigen Autoren wiederum durch die Anzahl der Items geteilt, um einen Durchschnittswert zu erhalten. Die PLS liegt allerdings nicht in einer deutschsprachigen Version vor und wurde für diese Studie übersetzt. Da sie aber nie für den deutschsprachigen Raum validiert wurde, hat ihr Einsatz explorativen und deskriptiven Charakter und dient dem Vergleich mit Studien zur Neurobiologie von Bindung, die ebenfalls die PLS einsetzen [72, 81, 83-85, 166].

4.5.4 Ablauf der Testung und Auswertung der Fragebögen

Der FA-SEB wurde unmittelbar vor der MEG Messung bearbeitet, da im Versuch auf Inhalte des FA-SEB Bezug genommen werden konnte. FSEV und PLS wurden an einem 2. Termin

bearbeitet, der innerhalb einer Woche nach der MEG Messung stattfand. Jeder Proband bearbeitete allein und ungestört in separaten Räumen die Fragebögen, wobei ein Untersucher für Fragen zu Verfügung stand. Die Bearbeitung des FA-SEB vor der Messung dauerte etwa 20 Minuten, der 2. Termin zur Bearbeitung von PLS und FSEV im Schnitt etwa 90 Minuten. Alle Daten wurden ausschließlich unter Verwendung von willkürlich zugewiesenen Zahlencodes erfasst, die keine Rückschlüsse auf die Identität der Versuchspersonen erlaubten. Die Verarbeitung und Auswertung der Daten erfolgte unter Verwendung von SPSS für Windows (Version 16.0).

Die entsprechenden Module des FSEV wurden hinsichtlich individueller oder partnerschaftlicher Probleme durch Störungen der Geschlechtsidentität, der sexuellen Funktion oder der sexuellen Präferenz ausgewertet. Weiterhin wurden dem FSEV wesentliche soziodemographische Daten und Informationen zur partnerschaftlichen und sexuellen Entwicklung und Einstellung der Probanden entnommen. Die Summenscores der Subskalen des FA-SEB wurden untereinander verglichen. Die Auswertung der PLS erfolgte durch Berechnung der Summe aller Items und Berechnung des mittleren Wertes pro Item (Summenscore geteilt durch Anzahl der Items) zum Vergleich mit oben genannten Studien. Für alle Ergebnisse wurden eventuelle geschlechtstypische Unterschiede analysiert. Eine weitere Fragestellung war, ob ein statistischer Zusammenhang zwischen Ergebnissen der MEG Untersuchung und Summenscores der FA-SEB Skalen, der PLS oder soziodemographischen Faktoren existiert.

Weil ein großer Teil der Daten ordinal skaliert ist, wurden zur statistischen Auswertung verteilungsfreie Verfahren verwandt. Werte innerhalb der Stichprobe wurden mittels Mann-Whitney-U-Test und Werte zwischen unabhängigen Gruppen (z.B. Geschlecht) mit Wilcoxon-Test verglichen. Als Signifikanzniveau wurde $p < .05$ festgelegt.

Schließlich wurde untersucht, ob die maximale Ausprägung von neuromagnetischen Signalen in bestimmten Zeitfenstern des Interesses mit Ergebnissen aus der Fragebogentestung korreliert. Hierzu ist allerdings zu bemerken, dass die Korrelation mit psychometrischen Daten bei elektrophysiologischen Untersuchungen weit weniger gebräuchlich als bei Experimenten mittels bildgebenden Verfahren ist. Ein Grund hierfür ist, dass eine lang andauernde ERP-Komponente wie das LPP auf mehreren parallel ablaufenden und das Signal überlagernden neuronalen Prozessen beruht, wie auch aus methodischen Ansätzen mittels *principal component analysis* (PCA) hervorgeht, mittels derer verschiedene Quellen eines bestimmten Signals differenziert werden können [58]. Die Studien, die Bindungsprozesse mittels EEG untersucht haben, beschreiben denn auch mit einer Ausnahme [74] keine Korrelation zwischen

elektrophysiologischen und psychometrischen Daten. Dennoch wurde angesichts der Fülle der erhobenen psychometrischen Daten nach eventuellen Korrelationen gesucht, wenn auch die Interpretation möglicher statistischer Zusammenhänge entsprechend zurückhaltend sein muss. Untersucht wurden hierfür die Dauer der Beziehung, die Anzahl der bisherigen Beziehungspartner, die berechneten Summenscores der PLS sowie der Subskalen des FA-SEB. Die hierfür untersuchte neuromagnetischen Aktivität waren die Zeitbereiche 400-700 ms, 700-1000 ms und 1000-1500 ms sowie die berechneten Maxima im Zeitfenster 400-700 ms und 700-1000 ms für die Stimuluskategorie „Syndyastisch“. Es wurde die zweiseitige Korrelation nach Spearman berechnet, das α -Niveau für signifikante Korrelationen lag bei $p < .05$.

5 Ergebnisse

5.1 Beschreibung der Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt 15 Paare teil, von denen 1 Paar weiblich gleichgeschlechtlich war und 14 gegengeschlechtlich. Die Stichprobe bestand also aus 30 Versuchspersonen im Alter zwischen 20 und 35 Jahren ($M 25.27 \pm 3.63$), davon 14 männlich ($M 26.14 \pm 3.98$) und 16 weiblich ($M 24.5 \pm 3.23$). Insgesamt 7 Paare (46.7 % der Stichprobe) lebten in einer gemeinsamen Wohnung, 2 Paare (13.3 % der Stichprobe) lebten zusammen und waren verheiratet. Die Beziehungsdauer lag durchschnittlich bei 3-4 Jahren, die Versuchsteilnehmer/innen gaben an, bisher zwischen 1 und 7 Beziehungspartner gehabt zu haben. Ein hoher Anteil der Probanden/innen führte eine exklusive Beziehung ohne sexuelle Kontakte außerhalb der Partnerschaft; 2 Frauen (12.5 % der Stichprobe) und kein Mann gaben an, momentan mehrere Sexualpartner zu haben.

Der Bildungsstand der Probanden/innen war relativ einheitlich: 25 Probanden hatten Abitur (83.3 %), 2 die Fachhochschulreife (6.7 %) und 3 Mittlere Reife (10 %). Die Versuchsteilnehmer kamen aus dem mittel-, süd- und osteuropäischen sowie nordamerikanischen Kulturkreis, lebten momentan alle in Deutschland und beherrschten die deutsche Sprache.

5.1.1 Ergebnisse der psychometrischen Untersuchung

Die Auswertung der entsprechenden Module des FSEV ergab keinen Hinweis auf eine Störung der Geschlechtsidentität oder eine Paraphilie. Sofern sexuelle Funktionseinschränkungen berichtet wurden, bestand meistens kein Leidensdruck oder es ergab sich in der Gesamtschau der Angaben beider Partner nicht der Eindruck einer die Beziehung belastenden sexuellen Funktionsstörung. Die wichtigsten Ergebnisse der psychometrischen Untersuchung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Auswertung des entsprechenden Moduls zeigte, dass die Probanden/innen ihre Zufriedenheit mit der Beziehung hoch einstufen. Ebenfalls sehr hohe Ratings erhielten die sexuelle Attraktivität des Partners und die Häufigkeit syndyastischer Interaktionen (*in den Arm nehmen* $M 4.47 \pm 0.9$, Median 5.00; und *in den Arm genommen werden* $M 4.3 \pm 1.022$, Median 5.00). Keiner diese Items unterschied sich signifikant zwischen den Geschlechtern. Bei der Beurteilung

der Wichtigkeit aller drei Dimensionen von Sexualität wurde die Bindungsdimension signifikant höher als die Lustdimension eingestuft (Wilcoxon-Test, $p = .006$). Für beide Geschlechter getrennt betrachtet, war dieser Unterschied nur in der weiblichen Gruppe signifikant (Wilcoxon-Test, $p = .018$), bei den Männern dagegen nicht (Wilcoxon-Test, $p = .165$). Die Reproduktionsdimension wurde insgesamt deutlich geringer bewertet und im Vergleich von den Männern signifikant höher als von den Frauen (Mann-Whitney-U Test, $p = .005$). Die Bewertung von Lust- und Bindungsdimension unterschied sich nicht signifikant zwischen den Geschlechtern (Mann-Whitney-U-Test, $p > .05$).

Die Summe der PLS lag durchschnittlich bei 197.87 ± 25.385 (Cronbachs $\alpha = .888$), bzw. 6.6 ± 0.846 wenn man die Summe der PLS durch die Anzahl der Items teilt (zu dieser Auswertemethode siehe [72, 81, 84, 85, 166]). Männer und Frauen unterschieden sich nicht in der Summe der PLS (Mann-Whitney-U-Test, $p = .934$). Die Auswertung des FASEB ergab, dass der Summenscore auf der Subskala „Partnerschaft“ ($M 79.27 \pm 7.728$, Cronbachs $\alpha = .89$) signifikant höher war als die Summe der Subskala „Sex“ ($M 75.2 \pm 8.608$ Cronbachs $\alpha = .873$, Wilcoxon-Test, $p < .01$). Sowohl die Subskalen „Sex“ als auch „Partnerschaft“ waren signifikant höher als die Subskala „Freundschaft“ ($M 64.4 \pm 15.325$, Cronbachs $\alpha = .958$, Wilcoxon-Test für Vergleich „Partnerschaft“ vs. „Freundschaft“ $p < .001$, Vergleich „Sex“ vs. „Freundschaft“ $p < .01$). Aufgrund der geringen Anzahl von nur 3 Probanden/innen mit Kindern wurden Ergebnisse der Subskala Syndyastische Erfüllung in der Beziehung zum eigenen Kind in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Für keine der Skalen konnte ein signifikanter Unterschied zwischen weiblichen und männlichen Probanden/innen gefunden werden. Vergleicht man jedoch die Skalen untereinander getrennt für jedes Geschlecht, ergaben sich Unterschiede: Bei den Männern war die Summe der Subskala „Partnerschaft“ signifikant höher als die der Subskala „Freundschaft“ ($M 79.79 \pm 6.93$ im Vergleich zu $M 63.43 \pm 8.373$; Wilcoxon –Test: $p < .01$), bei den Frauen war dieser Effekt ebenfalls signifikant, aber geringer ausgeprägt ($M 78.81 \pm 8.865$ im Vergleich zu $M 65.25 \pm 19.791$, Wilcoxon-Test $p = .033$). In der weiblichen Gruppe ergab sich dagegen ein signifikant höherer Score auf der Subskala „Partnerschaft“ als auf der Subskala „Sex“ ($M 78.81 \pm 8.565$ im Vergleich zu $M 73.75 \pm 8.963$, Wilcoxon - Test $p < .01$), dieser Unterschied war in der männlichen Gruppe zwar ebenfalls vorhanden, aber geringer und nicht signifikant ($M 79.79 \pm 6.930$ im Vergleich zu $M 76.86 \pm 8.189$, Wilcoxon-Test $p = .176$). Verglichen miteinander war in der männlichen Gruppe dagegen die Summe auf der Subskala „Sex“ signifikant höher als die in der Subskala „Freundschaft“ ($M 76.86 \pm 8.189$ im Vergleich zu $M 63.43 \pm 8.373$, Wilcoxon-

ERGEBNISSE

Test $p < .01$), dieser Effekt war wiederum in der weiblichen Gruppe vorhanden, aber nicht signifikant ($M 78.81 \pm 8.56$ im Vergleich zu $M 65.25 \pm 19.791$, Wilcoxon-Test: $p = .214$).

Tabelle 1: Auswertung der psychometrischen Untersuchung

Parameter	Mittelwert \pm SD	Median	Range
Dauer der Beziehung (Monate)	41.20 \pm 28.30	30.00	12-96
Anzahl der bisherigen Beziehungen	3.27 \pm 1.41	3.00	1-7
FA-SEB „Partnerschaft“	79.27 \pm 7.73	80.50	60-90
FA-SEB „Sex“	75.20 \pm 8.61	74.00	60-89
FA-SEB „Freundschaft“	64.40 \pm 15.33	64.50	18-90
PLS	197.87 \pm 25.39	199.00	137-247
Zufriedenheit mit Partnerschaft	4.37 \pm 0.62	4.00	3-5
Zufriedenheit Freundschaft 1	3.90 \pm 0.85	4.00	2-5
Zufriedenheit Freundschaft 2	3.33 \pm 0.89	3.00	2-5
Zufriedenheit mit Sexualität	3.80 \pm 0.71	4.00	3-5
Attraktivität des Partners	4.10 \pm 0.59	4.00	3-5
Bedeutung der Lustdimension	4.27 \pm 0.87	4.50	2-5
Bedeutung der Bindungsdimension	4.80 \pm 0.41	5.00	4-5
Bedeutung der Reproduktionsdimension	2.70 \pm 1.37	3.00	1-5

Ausgewählte Ergebnisse der psychometrischen Untersuchung. Ergebnisse der relevanten FA-SEB Skalen und des PLS sowie ganz unten einzelne Items aus dem Modul „Partnerschaftliche Einstellung“ des FSEV. Die Zufriedenheit mit Partnerschaft und den Freundschaften zu den Personen, deren Foto als weitere Stimuluskategorien diente, wurde separat erfragt. Diese Items wurden alle auf einer fünfstufigen Skala beantwortet (1-Minimum, 5-Maximum).

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass alle Probanden/innen syndyastische Bedürfnisse in höherem Maße in ihrer Beziehung sowie in der partnerschaftlichen Sexualität verwirklicht sehen als in engen Freundschaften, dass aber für die Männer dies exklusiver in der Partnerschaft stattfindet und Sexualität eine relativ gesehen größere Rolle spielt.

5.2 Ergebnisse der MEG-Messung

Zunächst wird die Auswertung der frühen, mit verschiedenen Stadien der Gesichtererkennung assoziierten Signale M100 und M170 dargestellt. Daraufhin wird die Analyse der neuromagnetischen Aktivität im mittleren und späten Zeitbereich beschrieben.

5.2.1 Auswertung von M100 und M170

Die M100 ist als Peak im Zeitintervall zwischen 50-150 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation und maximaler Ausprägung im Zeitbereich zwischen 70-130 ms definiert. Der einer M100 entsprechende positive Peak war bei 24 der Probanden/innen links und bei 6 auf der rechten Seite in temporal gelegenen Gruppen von Sensoren zu sehen. Als M170 ist ein positiver Peak definiert, der zwischen 100-240 ms nach Beginn der Stimuluspräsentation auftrat und dessen Maximum im Zeitbereich zwischen 140-200 ms fiel. Bei 28 Probanden/innen ließ sich ein entsprechender positiver Peak rechts in temporal gelegenen Gruppen von Sensoren nachweisen, bei 2 Personen links.

In Tabelle 2 werden die Ergebnisse der Auswertung von M100 und M170, gemittelt über alle Werte der einzelnen Versuchspersonen zusammengefasst. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der M100 und M170 gemittelt über die Werte aller Probanden/innen (*grand average*) als Zeitkurven und die Ausbreitung des magnetischen Dipols exemplarisch für eine Versuchsperson.

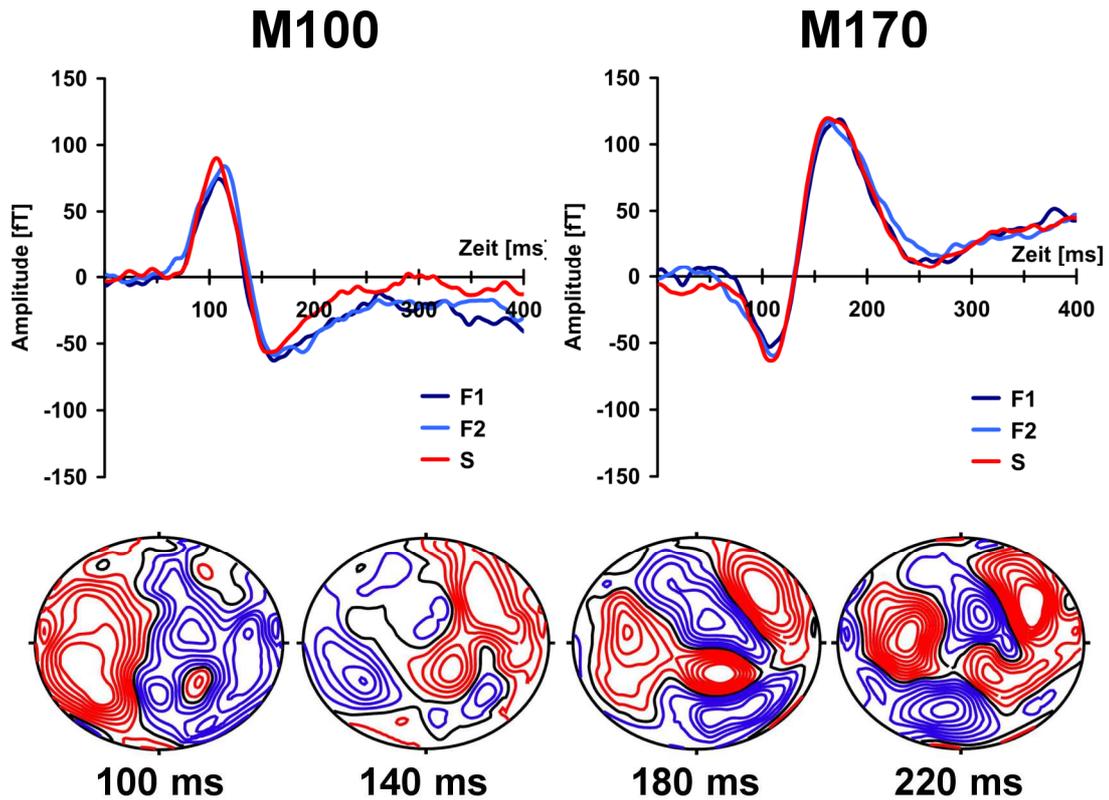


Abbildung 9: M100 und M170 (Zeitkurven und Feldkarten)

Magnetische Aktivität im Zeitbereich 0-400 ms registriert in okzipito-temporalen Sensorenclustern, gemittelt über alle Probanden/innen (n=30). Links aus Sensorengruppen mit einem positiven Maximum bei 100 ms über der linken Hemisphäre (M100), rechts der Sensoren mit einem positiven Maximum bei 170 ms über der rechten Hemisphäre (M170). Im unteren Abschnitt ist die Ausbreitung des magnetischen Feldes als zweidimensionale Darstellung im entsprechenden Zeitraum für eine repräsentative Versuchsperson (Code095) dargestellt. S = Syndyastisch, F1/F2 = beide freundschaftlichen Stimuli.

Tabelle 2: Auswertung der M100 und M170

M100	Freundschaft 1	Freundschaft 2	Syndyastisch	Gesamt
Amplitude (fT)	94.05	111.21	114.36	106.54
T-max. (ms)	109.5	108.6	110.9	109.7
Peakbeginn (ms)	90.9	91.5	94.0	92.1
Peakende (ms)	123.9	124.9	126.9	125.2
Peakdauer (ms)	33.0	33.4	32.9	33.1
M170				
Amplitude (fT)	147.32	151.13	157.36	151.94
T-max. (ms)	168.1	166.9	165.1	166.7
Peakbeginn (ms)	145.7	143.8	142.9	144.1
Peakende (ms)	198.1	195.4	193.4	195.6
Peakdauer (ms)	52.4	51.6	50.5	51.5

Zusammengefasst sind die Ergebnisse der Auswertung der M100 und M170 nach Stimuluskategorien und gesamt, d.h. unabhängig von der Stimuluskategorie. Als Peakbeginn und –ende wurden die Zeitpunkte definiert, an denen das magnetische Signal 50% der maximalen Aktivität am Peak über-, bzw. unterschritt. Die Zeit, in der das Signal größer als 50% der maximalen Aktivität war, wurde als Peakdauer definiert.

Mittels ANOVA mit Innensubjektfaktor Kondition wurde kein signifikanter Effekt der Stimuluskategorie auf Amplitude der M100 ($p = .082$) oder die Peaklatenz gefunden (Beginn des Peaks $p = .450$; Zeitpunkt des Maximums $p = .687$; Ende des Peaks $p = .592$). Eine ANOVA mit Zwischensubjektfaktor Geschlecht zeigte weder ein signifikante Interaktion von Geschlecht und Kondition noch eine Differenz zwischen den Geschlechtern an ($p > .05$).

Für die M170 zeigte eine ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Kondition keinen Einfluss der Stimuluskategorie auf Amplitude ($p = .452$) oder Peaklatenz (Beginn des Peaks:

ERGEBNISSE

$p = .423$; Zeitpunkt des Maximums: $p = .496$; Ende des Peaks: $p = .502$). Die ANOVA ergab für keinen der Werte eine signifikante Interaktion zwischen Kondition und Geschlecht ($p > .05$), zeigte aber einen signifikanten Effekt des Geschlechts als Zwischensubjektfaktor auf die Amplitude der M170 an ($p = .018$). Ein Post-hoc Vergleich mittels T-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass die Amplitude der M170 bei den männlichen höher als bei den weiblichen Versuchspersonen war (M170 Amplitude: Männer vs. Frauen: $p = .015$). Da sich in der ANOVA kein categoriespezifischer Effekt zeigt, wurde die über alle Versuchsbedingungen gemittelte Amplitude der M170 verglichen. In Abbildung 10 ist der Verlauf der neuromagnetischen Aktivität zwischen 0-400 ms für alle Probanden/innen nach Geschlecht getrennt dargestellt.

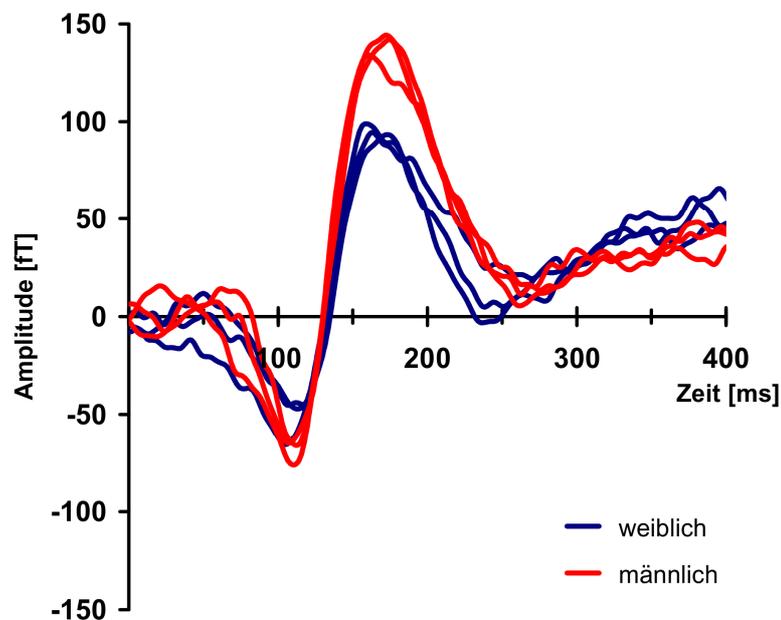


Abbildung 10: Geschlechterunterschied der M170-Amplitude.

Über alle Probanden/innen gemittelte magnetische Aktivität im Zeitbereich 0-400 ms. Die Aktivität ist für jede einzelne der Stimuluskategorien dargestellt, jedoch nur zwischen den Geschlechtern farblich unterschieden, da der Effekt unabhängig von der Kondition war.

Die Auswertung der späteren Zeitbereiche der nach der Signalstärke im frühen Zeitbereich von M100 und M170 ausgewählten Sensorengruppen zeigte in keinem der Zeitfenster einen signifikanten Effekt der Kondition auf das Signal ($p > .05$).

5.2.2 ERF mit mittlerer und langer Latenz

Die Auswertung der Sensorengruppen, die ein Maximum in Zeitbereich 400-700 ms aufwiesen ergab für alle Probanden/innen ein Signal im entsprechenden Zeitbereich, das rechtsseitig positiv und linksseitig negativ und deutlich stärker für die Kondition „Syndyastisch“ ausgeprägt war. Aufgrund der relativ hohen Anzahl von Sensoren pro Person, lagen diese verteilt über die Hemisphäre, allerdings deutlich mit einer eher zentralen und fronto-parietalen Verteilung. Auch die Auswertung der difference maps zeigt über die gesamte Stichprobe im Kontrast „Syndyastisch“ gegen „Freundschaft 1/2“ eine differente Signalaktivität fronto-parietal. Die Ansicht des Signalverlaufes zwischen 100-200 ms in den Zeitkurven zeigt darüber hinaus auch frühe ERF-Komponenten wie M100 und M170, die ebenfalls im ausgewählten Sensorencluster registriert wurden. Zwischen 200-400 ms ist die magnetische Aktivität bereits deutlich different; dieser Zeitbereich entspricht möglicherweise der *early posterior negativity* (EPN) in EEG-Studien als deren magnetischem Äquivalent (EPNm). Die Phase mit dem stärksten Effekt der Stimuluskategorie zwischen 400-700 ms fällt schließlich in die Phase des LPP und konstituiert das magnetische Homolog dazu (mLPP). Die Entwicklung des Signals und die einzelnen ERF-Komponenten, die innerhalb 0-1000 ms abgegrenzt werden können, sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Auswertung der von den Versuchspersonen zwischen den Bildpräsentationen gegebenen Bewertung ihrer subjektiven Reaktion erbrachte bereits in der Vorverarbeitung keinen Unterschied, so dass in die weitere Auswertung alle Trials unabhängig von der Anzahl an Mausklicks eingingen.

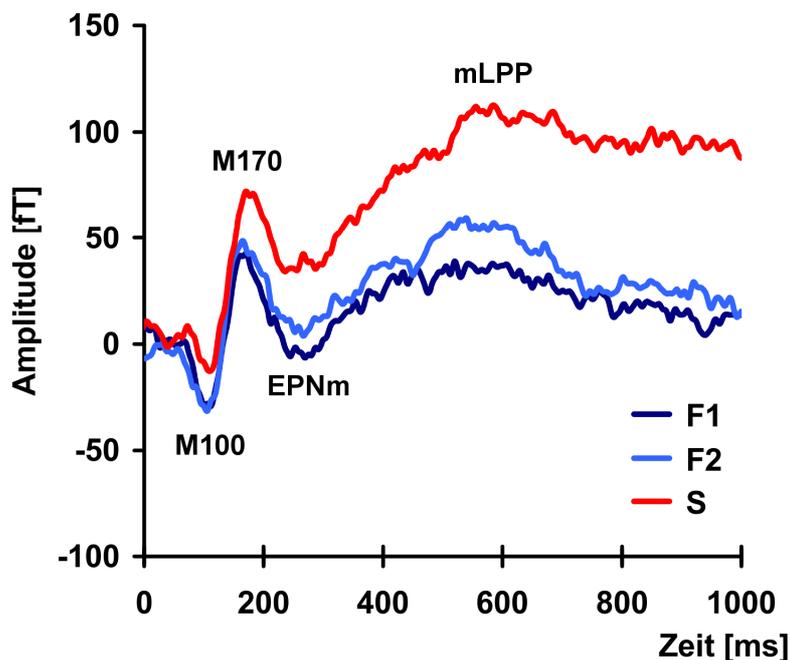


Abbildung 11: ERF-Komponenten im rechten Sensorencluster 0-1000 ms.

In der Abbildung ist die Entwicklung der magnetischen Aktivität zwischen 0-1000 ms dargestellt, die in den nach dem Signal 400-700 ms (mLPP) ausgewählten rechtsseitigen Sensorencluster registriert (und über alle Probanden/innen gemittelt) wurde. Darin lassen sich verschiedene andere ERF-Komponenten abgrenzen, so auch die eigentlich weiter occipital, bzw. temporal gelegenen M100 und M170. Die Phase zwischen 200-300 ms könnte mit der im Vergleich zum mLPP umgekehrten Polarität das magnetische Korrelat der *early posterior negativity* (EPNm) darstellen; S = Syndyastisch, F1/F2 = beide freundschaftlichen Stimuli.

Die statistische Auswertung der Zeitfenster mittels ANOVA zeigt einen signifikanten Effekt für den Innensubjektfaktor Kondition in den Zeitfenstern 200-400 ms, 400-700 ms, 700-1000 ms, 1000-1500 ms und 1500-2000 ms. Post-hoc Vergleiche mittels gepaarten T-Tests zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen den Konditionen „Syndyastisch“ und „Freundschaft 1“ sowie „Freundschaft 2“, während diese sich wiederum in keinem der Zeitfenster signifikant voneinander unterscheiden (Abbildung 12, Tabelle 3). Im Verlauf nach 2000 ms ist dieser Effekt zwar noch deutlich sichtbar, eine ANOVA für das Zeitfenster 2-3 s zeigt jedoch keinen statistisch signifikanten Effekt der Kondition auf die mittlere Feldstärke mehr (für das positive Signal: $p = .11$; für das negative Signal: $p = .05$). Post-hoc Vergleiche zeigen, dass der Kontrast zwischen der Kondition Syndyastisch im Bereich 2-3 s immer noch ausgeprägt, aber nicht mehr statistisch signifikant ist: Für das positive Signal zeigt sich unverändert keine Differenz zwischen

den freundschaftlichen Stimuli (F1 vs. F2: $p = .90$), der Kontrast F 1 vs. S ($p = .08$) und F 2 vs. S ($p = .08$) ist nicht mehr signifikant. Für das negative Signal ergeben sich für den Zeitbereich 2-3 s noch p-Werte knapp unterhalb $p = .05$ für den Vergleich F 1 und F 2 vs. S (F 1 vs. S: $p = .019$; F 2 vs. S: $p = .049$) und nicht für F 1 vs. F 2 ($p = .65$). Im Bereich 3-4 s verschwindet der Effekt schließlich, bis für die Zeitbereiche 4-5 s und 5-6 s der Kontrast zwischen allen 3 Konditionen nicht zu unterscheiden ist. Für den Zwischensubjektfaktor Geschlecht konnte in der ANOVA kein signifikanter Effekt und auch keine signifikante Interaktion mit dem Faktor Kondition gefunden werden.

Die Ergebnisse der ANOVA und Post-hoc Vergleiche, die einen signifikanten Einfluss der Kondition auf die mittlere Feldstärke zeigen, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Abbildung 12 zeigt die positive und negative Ausprägung der neuromagnetischen Aktivität für die gesamte Stimuluspräsentation.

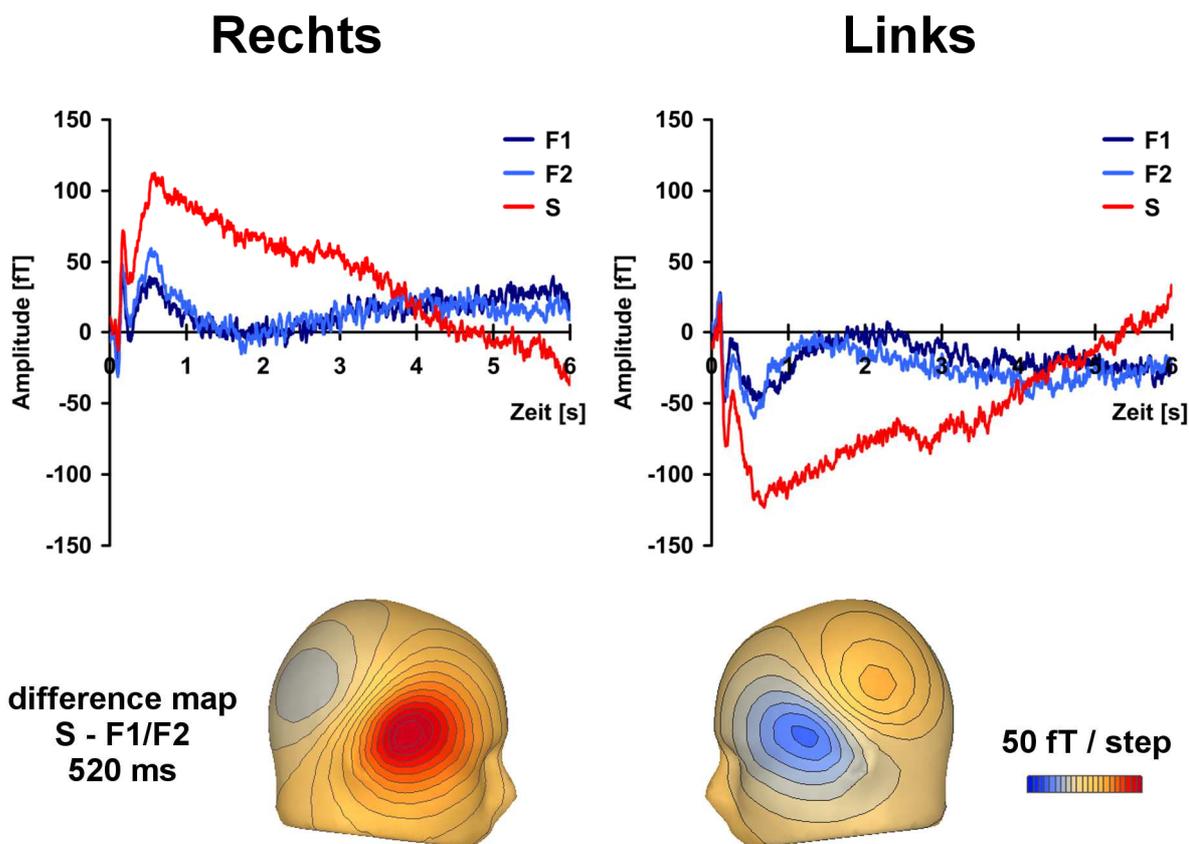


Abbildung 12: Signalverlauf 0-6000 ms

Über alle Probanden/innen gemittelt die magnetische Aktivität für die gesamte Zeit der Stimuluspräsentation (0-6000 m) in bilateralen Sensorengruppen mit rechts positivem und links negativem magnetischen Fluss. Darunter die Darstellung des regionalen Magnetfeldes mittels *difference map*; hier wurden beide freundschaftlichen Konditionen gemittelt und dann mit der syndyastischen kontrastiert. Korrespondierend mit der Auswertung der Sensorengruppen zeigt sich auch hier ein rechts positives und links negatives Feld, das stärker in der syndyastischen Kondition war.

Während der maximalen Ausprägung des Effektes der Kondition im Zeitbereich 400-1000 ms sind die Kontraste im Post-hoc Vergleich zwischen den Konditionen S vs. F1 und F2 so deutlich signifikant, dass sie auch eine Korrektur des α -Fehlerniveaus nach Bonferroni „überstehen“ würden. In Tabelle 3 werden daher p-Werte $< .0005$ besonders gekennzeichnet. Bei einer Anzahl von 100 Tests, die in dieser Untersuchung nicht erreicht wird, entspräche dies einem nach Bonferroni korrigierten α -Fehlerniveau.

Tabelle 3: ANOVA Effekte und Post-hoc Vergleiche für die Zeitfenster 0-2000 ms

Faktor	0 - 200	200 - 400	400 - 700	700 - 1000	1000 - 1500	1500 - 2000
	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>
Positiver Peak						
Kondition	.05	< .001	< .001	< .001	< .001	.005
F 1 vs. F 2	.95	.24	.23	.57	.87	.9
F 1 vs. S	.054	.001	< .001*	< .001*	< .001*	.008
F 2 vs. S	.02	<.001	< .001*	< .001*	.001	.005
Negativer Peak						
Kondition	.05	< .001	< .001	< .001	< .001	.002
F 1 vs. F 2	.79	.20	.38	.32	.73	.78
F 1 vs. S	.01	< .001*	< .001*	< .001*	< .001*	.001
F 2 vs. S	.06	.002	< .001*	< .001*	< .001*	.003

Übersicht über die Ergebnisse der ANOVA mit Innensubjektfaktor Kondition und der Vergleiche mittels T-Tests. Zusammengefasst sind die Zeitfenster für den Bereich zwischen 0-2000 ms, in den der signifikante Effekt der Kondition fällt. Mit * gekennzeichnet sind die p-Werte, die kleiner als 0.0005 sind, welches einem nach Bonferroni korrigierten Alpha-Niveau bei insgesamt 100 Tests entspräche.

Die Gruppen von Sensoren, die eine maximale Aktivität zwischen 400-1000 ms zeigten, überlappten zum Teil mit denen der frühen ERF. Die Ausdehnung des magnetischen Feldes im späten Zeitbereich ist in Abbildung 13 mittels Feldkarten (*difference maps*) dargestellt. Hier wurde aufgrund der zu keinem Zeitpunkt differenten Aktivität zwischen beiden freundschaftlichen Bedingungen die Aktivität beider Konditionen übereinander gemittelt und gegen die Bedingung „Syndyastisch“ kontrastiert. Die Ausdehnung der differenten Felder ist passend zur ebenfalls fronto-parietalen Lokalisierung der ausgewählten Sensorencluster. Außerdem ist die auf Sensorenebene resultierende Positivität über der rechten und Negativität über der linken an der Ausbreitung des magnetischen Feldes nachvollziehbar. Dieses entspricht

theoretischen Überlegungen, nach denen der zentrale, mittelliniennahe und von posterior nach anterior orientierte elektrische Dipol des LPP im EEG ein magnetisches Feld mit positivem magnetischen Fluss über der rechten Hemisphäre und entsprechend negativem über der linken hervorrufen würde [79].

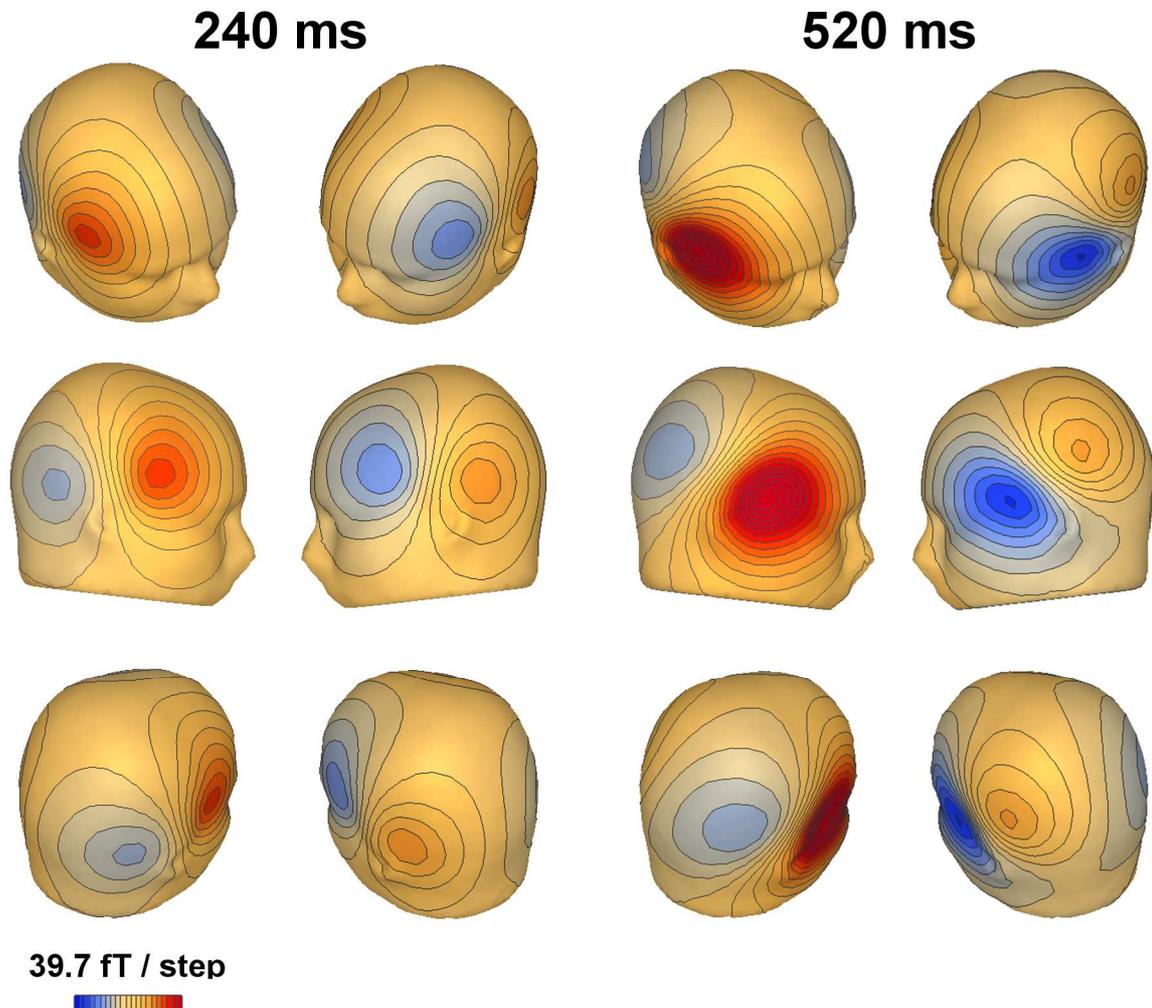


Abbildung 13: Ausbreitung des magnetischen Feldes (difference maps)

Für die *difference maps* wurden beide freundschaftlichen Konditionen (F1/F2) gemittelt und mit der syndyastischen kontrastiert. Die Entwicklung des mLPP ist bei den beiden gewählten Zeitpunkten (240 ms und 520 ms) gut zu erkennen; die Ausbreitung des magnetischen Feldes passt am ehesten zu einem zentralen, fronto-parietalen elektrischen Dipol mit posterior-anteriorer Ausrichtung wie beim LPP beschrieben. Bei 240 ms ist über okzipitalen Regionen ein mögliches Korrelat der *early posterior negativity* (EPNm) mit im Vergleich zum mLPP umgekehrter Polarität zu erkennen.

5.3 Korrelationen der Signale mit psychometrischen Daten

Weder Amplitude noch Latenz der frühen ERF korrelierte signifikant mit Ergebnisse aus der psychometrischen Untersuchung. Über den Zusammenhang der frühen Signale mit Geschlecht und Kopfgröße wurde unter 5.2.1 berichtet.

Die mittlere magnetische Aktivität in den Zeitfenstern 400-700 ms und 700-1000 ms, in denen der categoriespezifische Unterschied am stärksten ausgeprägt war, korrelierte nicht signifikant ($p > .05$) mit soziodemographischen Daten zur Beziehung (Dauer der Beziehung, Anzahl bisheriger Partner) oder Ergebnissen aus FA-SEB, PLS oder FSEV. Die Maxima der entsprechenden Zeitbereiche korrelierten positiv mit der Dauer der Beziehung in Monaten: Maximum 400-700 ms: Korrelationskoeffizient nach Spearman $r = .650$, $p < .001$; Maximum 700-1000 ms: Korrelationskoeffizient nach Spearman $r = .670$, $p < .001$.

Bei Ansicht der Daten zeigt sich, dass die Signalverläufe im Zeitbereich nach 500 ms sehr heterogen sind und einzelne Versuchspersonen keine deutlichen Peaks zeigen, selbst nach Auswahl der Kanäle, die eine maximale Aktivität abbilden. Daher wurden die Datensätze, deren maximales Signal in den Zeitbereichen 400-700 ms und 700-1000 ms über einem minimalen Cut-Off-Wert lag, gesondert ausgewertet. Dieser untere Schwellenwert wurde bewusst niedrig ausgewählt, für das Zeitfenster 400-700 ms mit 80 fT und für 700-1000 mit 60 fT, wohlgerneht für den maximalen und nicht gemittelten Wert dieses Zeitintervalls. Aus der gesamten Stichprobe erfüllten 25 von 30 Versuchspersonen diese Kriterien. Bei der Analyse dieser Subgruppe zeigt sich eine positive Korrelation der mittleren neuromagnetischen Aktivität mit der Subskala „Partnerschaft“ des FA-SEB (Korrelationskoeffizient nach Spearman): 400-700 ms: $r = .429$, $p = .032$; 700-1000 ms: $r = .531$, $p = .006$; 1000-1500 ms: $r = .404$, $p = .045$. Darüber hinaus zeigt das Maximum im Zeitbereich 700-1000 ms eine signifikante negative Korrelation mit der Subskala „Freundschaft“ des FA-SEB (Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -.474$, $p = .017$). Auch in dieser Subgruppe zeigt sich eine positive Korrelation der maximalen magnetischen Aktivität mit der Dauer der Beziehung in Monaten im Zeitbereich 400-700 ms (Korrelationskoeffizient nach Spearman $r = .614$, $p = .001$) und 700-1000 ms (Korrelationskoeffizient nach Spearman $r = .558$, $p = .008$), zusätzlich eine negative Korrelation des Maximums im Bereich 400-700 ms mit der Anzahl bisheriger Beziehungspartner/innen ($r = -.523$, $p = .007$). Der Vergleich zwischen den nach Stärke des magnetischen Signals ausgeschlossenen Personen ($n = 5$) mit dem Rest der Stichprobe ($n = 25$) zeigt für keine der

ERGEBNISSE

untersuchten Daten aus der psychometrischen Testung einen signifikanten Unterschied (Mann-Whitney-U-Test: $p > .05$).

6 Diskussion

In dieser Studie wurden in einer Stichprobe mit 30 Versuchspersonen neuromagnetische Signale in der Reaktion auf die Präsentation von Photographien gemessen, welche den Beziehungspartner und 2 befreundete Personen zeigten. Das experimentelle Paradigma umfasste dabei das passive Betrachten unterschiedlich emotional besetzter Gesichter in Verbindung mit emotionaler Imagination. Zunächst sollen nachfolgend Zusammensetzung der Stichprobe und die Ergebnisse der psychometrischen Untersuchung diskutiert werden, um zu erörtern, ob die Voraussetzungen gegeben waren, die Verarbeitung emotionaler, mit Bindung verknüpfter Reize zu studieren. Danach werden ausführlich die Ergebnisse der MEG-Messung in Bezug zur im Einführungsteil referierten Forschungsliteratur gesetzt und interpretiert.

6.1 *Diskussion der psychometrischen Untersuchung*

Die Zusammensetzung der Stichprobe nach Alter, Beziehungsstatus und -dauer gibt keinen Hinweis auf mögliche sekundäre Einflussfaktoren oder Verzerrung. Die Auswertung der soziodemographischen Daten und Ergebnisse der Fragebogenuntersuchung zeigt, dass die Stichprobe ein hohes Maß an Beziehungszufriedenheit aufweist; damit sind in der Stichprobe die Voraussetzungen vorhanden, die Reaktion auf syndyastisch relevante Stimuli und bindungsassoziierte Emotionen zu untersuchen. Gleichzeitig ergab die Auswertung des FSEV keinen Anhalt für konflikthafte Konstellationen in den Beziehungen aufgrund sexueller oder partnerschaftlicher Probleme. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dennoch partnerschaftliche oder individuelle, sich in der Partnerschaft manifestierende Probleme existierten, die aufgrund von Scham oder sozialer Erwünschtheit nicht angegeben wurden. Befragungen zu Partnerschaft und Sexualität unterliegen generell einer Verzerrung durch Scham, Wunschdenken und soziale Erwünschtheit [162]. Die inhaltliche Zielsetzung der Studie auf neurobiologische Aspekte menschlicher Bindung war den Probanden/innen außerdem bekannt und kann zu einer entsprechenden Erwartungshaltung sich selbst gegenüber geführt haben.

Die Probanden/innen erzielten auf der Subskala Partnerschaft sowie partnerschaftliche Sexualität des FA-SEB signifikant höhere Werte als auf der Subskala Freundschaft. Man kann daraus auf eine stärkere, bzw. exklusive Erfüllung syndyastischer Bedürfnisse in der partnerschaftlichen Beziehung im Vergleich zur freundschaftlichen schließen. Der vorausgesetzte inhaltliche

Kontrast zwischen Gesichtern mit partnerschaftlichen oder freundschaftlichen Assoziationen ist in der subjektiven Bewertung der Versuchsteilnehmer existent, unterliegt aber offenbar einem geschlechtsabhängigen Unterschied: Die männlichen Versuchspersonen geben eine höhere Bedeutung der Sexualität an als Frauen und erleben die Erfüllung syndyastischer Bedürfnisse offenbar exklusiver innerhalb der Paarbindung als Frauen. Diese Exklusivität ist bei den weiblichen Versuchspersonen geringer ausgeprägt, zwischenmenschliche Nähe in engen Freundschaften spielt für sie eine größere Rolle als für die Männer. Diese unterschiedlich bewertete Bedeutung partnerschaftlicher, partnerschaftlich-sexueller und freundschaftlicher Interaktionen für die Erfüllung syndyastischer Bedürfnisse zwischen den Geschlechtern verweist möglicherweise auf geschlechtstypische Verhaltensweisen und Attitüden [1, 167]. Diese Unterschiede lassen sich jedoch nicht dahingehend interpretieren, dass der als zwischen freundschaftlichen und syndyastischen Stimuli vorausgesetzte Kontrast nicht oder nicht ausreichend existent ist, sondern vielmehr einen geschlechtstypischen Unterschied aufweist, aber dennoch in der gesamten Stichprobe nachweisbar ist. Die neuromagnetische Reaktion auf die Präsentation des Gesichts des Partners im Vergleich zu freundschaftlichen spiegelt diesen Unterschied in keiner Weise wider, auch die bereits erwähnten Studien zum Thema konnten unter Verwendung ähnlich kontrastierter Stimuli bindungsassoziierte emotionale und kognitive Reaktionen bei beiden Geschlechtern hervorrufen [72, 73, 81, 84-86].

Die Auswertung der PLS zeigte im Vergleich zu inhaltlich ähnlichen Studien niedrigere Werte [72, 81, 85]. Allerdings liegt die durchschnittliche Dauer der Beziehungen der hier untersuchten Probanden/innen deutlich über der in diesen vergleichbaren Studien. Hatfield und Sprecher berichten in der Erstpublikation des Fragebogens eine deutliche inhaltliche Abhängigkeit der PLS von der Dauer einer Beziehung [165], was eine mögliche Erklärung für die vergleichsweise niedrigeren Werte in dieser Stichprobe sein könnte. Hierfür spricht auch der Vergleich mit der Studie von Acevedo et al., die langfristige Beziehungen mit Versuchspersonen, die zwischen 10 und 29 Jahren verheiratet waren untersuchten und in dieser Stichprobe einen mittleren Wert der PLS von 5.51 beschreiben [84]; dieser Wert liegt sogar unter dem in dieser Untersuchung erhobenen, die fMRT-Ergebnisse wiederum waren den Studien mit Probanden/innen in kurzen Beziehungen sehr ähnlich. Es zeigte sich in unserer Stichprobe keine negative Korrelation der PLS mit der Dauer der Beziehung, die weiter auf einen solchen Zusammenhang deuten könnte (Korrelation nach Pearson $r = .129$, $p = .50$), jedoch eine signifikante negative Korrelation mit der bisherigen Anzahl an Beziehungen (Korrelation nach Pearson $r = -.489$, $p = .006$), die mit diesem Zusammenhang assoziiert sein könnte. Gleichwohl lässt sich ein Zusammenhang der

PLS mit der Dauer der Beziehung innerhalb dieser Stichprobe nicht genau verfolgen, da alle Paare mindestens 1 Jahr zusammen waren und damit der Vergleich mit kürzeren Beziehungen wie in den zitierten Studien fehlt.

Die Interpretation der Ergebnisse der PLS wird unabhängig davon durch methodische Probleme kompliziert, da die PLS nicht für den deutschsprachigen Gebrauch oder einen mitteleuropäischen Kulturraum validiert wurde. Die Autoren der PLS Hatfield und Sprecher [165] schließen in ihr Konzept der *passionate love* beispielsweise das sog. *dating* ein, für das ein deutlicher kultureller Unterschied zu Nordamerika besteht und das in ähnlich ritualisierter Form hier nicht existiert oder unverbindlicher als eine feste Beziehung bewertet werden könnte.

Zusammenfassend lässt sich trotz dieser Einschränkungen aus der psychometrischen Untersuchung dennoch postulieren, dass in der Stichprobe neben einem hohen Maß an Beziehungszufriedenheit und bindungstypischen Emotionen auch ein ausreichender qualitativer emotionaler Kontrast zwischen der Beziehung zum Partner und zu befreundeten Personen existierte.

6.2 Diskussion der MEG-Messung

Die hier erstmals gemessene neuromagnetische Aktivität während der Verarbeitung partnerschaftlich relevanter Gesichter und begleitender emotionaler Imagination soll hinsichtlich der bereits existierenden Literatur diskutiert werden; im Vordergrund steht dabei die Beziehung der hier beobachteten späten und lang andauernden Aktivität zum *late positive potential* (LPP) in ERP-Studien als Korrelat emotionaler Prozesse sowie den in diesem Zusammenhang beschriebenen Determinanten einer solchen elektrophysiologischen Reaktion.

Als Vorbemerkung soll jedoch zuvor kurz auf die Datenqualität und den anzunehmenden zerebralen Ursprung der gemessenen Signale eingegangen werden. Nach der bei MEG-Experimenten üblichen Mittelung über mehrere Trials bei randomisierter Stimuluspräsentation kommt ein externes (technisches) Artefakt als Quelle der über die Stichprobe nachweisbaren Aktivität nicht in Betracht. Darüber hinaus sind verschiedene ERF-Komponenten wie M100, M170, EPNm und mLPP in der Stichprobe nachweisbar, die in Phänotyp und Latenz mit den in der Forschungsliteratur mehrfach publizierten Werten übereinstimmen. Wenn die Messdaten durch externe Artefakte mit Ursprung außerhalb der Messkabine oder im MEG-System überlagert wären, sollte sich dieser Einfluss bereits in der frühen Phase, bzw. unabhängig von der Stimuluspräsentation zeigen und die frühen Signale verzerren oder überdecken. Die Ansicht der

Feldkarten, also der Darstellung der regionalen Ausrichtung des Magnetfeldes zu einem bestimmten Zeitpunkt, zeigt ebenfalls eine typische Anordnung der mit M100 und M170 korrelierenden magnetischen Dipole, wogegen Artefakte zu atypischen Feldmustern führen würden. Auch die späteren Signale lassen sich in regionaler Ausbreitung und Zeitverlauf auf ähnliche Studien beziehen (siehe unten).

Gegen einen zwar physiologischen, aber extrazerebralen Ursprung der gemessenen Aktivität, wie z.B. erhöhter Muskeltonus, verstärkte Okulomotorik oder kardiovaskuläre Reaktionen oder Änderungen der Atmungsfrequenz spricht weiterhin die Verwendung von variablen Stimulusintervallen, womit eine Koppelung der magnetischen Aktivität an ein regelmäßiges Muster wie den Herzschlag vermieden wird. Durch die vorgenommene Artefaktbereinigung können Artefakte dieser Art zusätzlich minimiert, wenn auch im Nachhinein nicht komplett ausgeschlossen werden. Artefakte durch Augenbewegungen, die ein im Vergleich zu zerebraler Aktivität (femto-Tesla Bereich) starkes biomagnetisches Signal im piko-Tesla Bereich verursacht, können jedoch mittels geeigneter Algorithmen durch Ausschluss kontaminierter Epochen relativ sicher ausgeschlossen werden.

Ausgehend von der meist praktizierten [45] inhaltlichen Gliederung in frühe und späte Phasen visueller Verarbeitung, die mit Signalen kurzer (<200 ms), mittlerer (200-300 ms) und langer (>300 ms) Latenz korrelieren, sollen nachfolgend die Ergebnisse der MEG-Messung diskutiert werden. Auf Signale mittlerer Latenz in Reaktion auf emotionale Bilder, namentlich die *early posterior negativity* (EPN) in ERP-Studien [50] und das entsprechende magnetische Korrelat der EPNm [168] wird dabei nicht im gleichen Detail wie zum *late positive potential* (LPP/mLPP) eingegangen, da dieses im Fokus dieser Untersuchung stand und demzufolge mit höherem Aufwand analysiert wurde.

6.2.1 Frühe und gesichterspezifische ERF: M100/M170.

Die neuromagnetischen Signale im Zeitbereich 100-200 ms entsprechen den als M100 und M170 bezeichneten Signalen und unterscheiden sich in Phänotyp und Latenz nicht von der in der Literatur beschriebenen Form, wie beispielsweise bei Liu et al. [23]. Die Stimuluskategorie hatte keinen Einfluss auf Feldstärke (Amplitude) oder zeitliche Latenz dieser Signale.

Die vor allem rechtsseitige Lateralisierung des magnetischen Dipols zwischen 140-200 ms steht im Einklang mit den Arbeiten, die Gesichtererkennung als Prozess in einem bilateralen Netzwerk mit Dominanz der rechten Hemisphäre charakterisieren [16, 18, 20, 169]. M100 und M170 sind

beide signifikant stärker ausgeprägte Signale in der Reaktion auf Gesichter verglichen mit anderen Objekten, z.B. Häusern und reflektieren die Kategorisierung und Identifikation eines Gesichts [23]. Diese innerhalb 200 ms auftretenden Signale entsprechen einem obligatorischen, robusten Stadium der visuellen Verarbeitung von Objekten und spezifisch Gesichtern [37, 47, 48] auf Ebene des *structural encodings* nach dem Modell von Bruce und Young [12]. Amplitude und Latenz dieser früh auftretenden Signalen reagieren auf Veränderungen von Helligkeit, Kontrast, Größe oder Komplexität der Stimuli [46, 48]. Emotionale Inhalte visueller Reize werden ebenfalls bereits früh wahrgenommen und mit entsprechender Priorität verarbeitet, wenn sie explizit in Mimik und Expression von Gesichtern kodiert sind oder wenn durch die Blickrichtung auf potentiell aversive oder appetitive Situationen hingewiesen wird [33, 36, 40, 170]. Die in dieser Studie präsentierten Stimuli unterschieden sich nicht systematisch in explizit kodierter emotionaler Information wie Mimik, Expression oder Blickrichtung. Der Unterschied zwischen den Stimuluskategorien war unabhängig von diesen Aspekten implizit kodiert. Die Verarbeitung implizit kodierter emotionaler Information erfordert eine komplexere Verarbeitung, den Abruf kontextueller Informationen und Evaluation des Materials, also Analyseschritte, die mit Signalen längerer Latenz frühestens ab 300 ms nach Stimuluspräsentation korrelieren [44, 45, 55].

Das experimentelle Paradigma dieser Untersuchung verlangte außerdem keine schnelle Reaktion in Form von Erkennung oder Kategorisierung bestimmter Stimuli in einer Gruppe davon differenter Stimuli oder spezieller Eigenschaften der Gesichter, so dass ein Effekt innerhalb des frühen und mittleren Zeitbereiches durch verstärkte, bzw. selektive Aufmerksamkeit wie bei Diskriminationsaufgaben [45] nicht zu erwarten war. Eine zwischen den Effekten expliziter und impliziter Verarbeitung bestimmter Aspekte von Gesichtern vergleichende Untersuchung demonstrierte kürzlich dementsprechend, dass die Amplitude der M170 durch den emotionalen Ausdruck eines Gesichts verstärkt wurde, wenn die Probanden im Rahmen des experimentellen Paradigmas die Emotionalität beurteilen sollten; ein solcher Effekt auf die Amplitude der M170 war jedoch abwesend, wenn die Gesichter nicht bezüglich des Ausdrucks, sondern ihres Geschlechts beurteilt werden sollten [42]. Familiarität, also das Ausmaß der Bekanntheit des Gesichts, als weitere potentielle Einflussgröße auf frühe sowie späte Signale [38, 68] bestand für alle Stimuli in mutmaßlich gleichem Maß; oder eventuelle Unterschiede im Ausmaß der Familiarität waren zu subtil, um den in vorherigen Studien ähnliche signifikante Effekte auf die frühen Signale zu erzeugen.

Zusammenfassend entspricht der abwesende Einfluss der Stimuluskategorie auf die hier ausgewerteten Signale M100 und M170 als typische biomagnetische Korrelate bestimmter Stadien der Gesichterverarbeitung den bereits formulierten Vorstellungen zum Ablauf der Analyse und Evaluation implizit kodierter sozial und emotional relevanter Information in Gesichtern.

6.2.1.1 Geschlechtsabhängiger Unterschied der Amplitude der M170

Die Amplitude der M170 wies als einziges der hier im Detail ausgewerteten Signale einen signifikanten Einfluss des Geschlechtes der Versuchspersonen auf die neuromagnetische Aktivität unabhängig von der Stimuluskategorie auf. Ein Geschlechterunterschied wird in den meisten Studien zur Gesichterverarbeitung nicht beschrieben [15, 16, 18]; das Geschlecht der Versuchsperson als Faktor ist in der elektrophysiologischen Forschung bislang allerdings unterrepräsentiert [45], was eine inhaltliche Einordnung dieser Beobachtung erschwert.

Als denkbarer Einflussfaktor käme eine von Männern höher empfundene Relevanz von Attraktivität in der Wahrnehmung von Gesichtern in Betracht [8, 171]. Diese Geschlechterunterschiede scheinen sich aber erst im Zeitbereich nach mindestens 300 ms zu manifestieren [172] und sind insgesamt eher selten dokumentiert. Andere Studien beschreiben einen allerdings vom Geschlecht unabhängigen Effekt von Attraktivität auf sowohl das LPP als auch bereits frühere Signale bei etwa 250 ms [59] und sogar 150 ms [173]. Der Ursprung solcher Signale wird aber eindeutig als distinkt von der Quelle früher Signale, die während der Verarbeitung von Gesichtern auftreten wie P100 und N170 [24], lokalisiert, bieten also keine Erklärung für eine Modulation der M170 durch die Attraktivität der präsentierten Gesichter. Die höhere Amplitude dieser Signale trat außerdem nicht automatisch auf, sondern war abhängig von der durch das experimentelle Paradigma auf die Attraktivität gerichtete Aufmerksamkeit der Probanden/innen. Eine solche aufmerksamkeitsabhängige *top-down* Modulation bereits der frühen gesichterspezifischen Signale, also im EEG der N170, bzw. im MEG der M170 wird grundsätzlich kontrovers diskutiert [17, 37]; ein Einfluss expliziter im Vergleich zu impliziter Verarbeitung wurde für die M170 [42], von anderen Autoren jedoch erst für spätere Zeitbereiche um 230 ms beschrieben [41]. Studien mittels bildgebender Verfahren zur Verarbeitung attraktiver Gesichter zeigen ebenfalls vereinzelt geschlechtstypische Unterschiede wie eine bei männlichen Versuchspersonen gesteigerte Aktivität im anterioren Zingulum und höherem, psychophysisch gemessenem *arousal* [109] oder eine stärkere Aktivierung des Orbitofrontalkortex [107]. Diese fMRT-Studien geben zwar wenig Aufschluss über den

zeitlichen Verlauf neuronaler Aktivität, deuten wie die oben zitierte theoretische, bzw. psychologische Literatur für eine priorisierte Verarbeitung von Attraktivität bei Männern. Eine solche Priorität für attraktive Gesichter führt zu verstärkter Allokation von Aufmerksamkeit und würde allerdings auch eher eine Modulation bioelektrischer und biomagnetischer Signale mit langer Latenz erwarten lassen. Um neuromagnetische Korrelate einer (mutmaßlich) bei Männern höheren Responsivität auf Attraktivität zu untersuchen, müssten vor allem weitere Informationen vorliegen, zumindest eine vergleichende Beurteilung der Attraktivität der präsentierten Gesichter.

Letztlich stellt der Befund einer geschlechter-differenten M170-Amplitude in Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit einen Nebenbefund dar. Für eine detaillierte Betrachtung wäre eine erweiterende Datenauswertung insbesondere mit Berücksichtigung auch der Lateralität der M170 notwendig. Eine solche Auswertung weist die über den Rahmen dieser Arbeit hinaus, wird aber als interessanter Aspekt in einer Publikation weiter verfolgt.

6.2.2 Das magnetische Äquivalent des late positive potentials (mLPP).

Der in dieser Studie beobachtete signifikante Effekt der Kondition auf die neuromagnetische Aktivität ist maximal ausgeprägt zwischen 400-700 ms, einem Zeitbereich, in dem in ERP-Studien konsistent eine verstärkte elektrische Aktivität mit positiver Polarität in Reaktion auf emotionale Stimuli beobachtet wird; nachfolgend an Signale wie das P300-Potential, bzw. P3 und P3b, werden solche Signale wie bereits beschrieben meistens als *late positive potential* (LPP) bezeichnet und mit evaluativen und aufmerksamkeitsabhängigen Prozessen in Reaktion auf eine emotionale und motivationale Qualität der präsentierten Stimuli assoziiert [44, 55]. Mehrere Untersuchungen mittels EEG zur Verarbeitung von sozial und emotional unterschiedlich relevanten Gesichtern demonstrieren ein solches verstärktes LPP in Reaktion auf das Gesicht des Partners [71-73] und nahen Familienangehörigen; so den eigenen Kindern [76, 77] und Eltern [71, 74]. Daher ist naheliegend, die in dieser Untersuchung beobachtete magnetische Aktivität als neuromagnetisches Äquivalent des LPP (mLPP nach [67]) zu interpretieren.

Ein weiteres Argument für die Beziehung zwischen dem LPP und der hier beobachteten neuromagnetischen Aktivität resultiert bereits aus theoretischen, bzw. methodischen Überlegungen (und wird ausführlich von Wessing et al. [79] referiert): Die EEG-Untersuchungen, die ein verstärktes LPP in Reaktion auf emotionale Stimuli und insbesondere

partnerschaftlich oder auf andere Weise sozial und emotional bedeutender Gesichter (Familienmitglieder, eigene Kinder) zeigen, beschreiben eine verstärkte Signalaktivität in maximaler Ausprägung zwischen 400-700 ms, wobei das exakte Zeitfenster leicht variiert. Die Polarität war dabei in zentro-parietalen Elektroden (Cz, Pz) positiv und im Vergleich dazu in frontalen Elektroden (Fz) negativer [44, 55, 71-74, 76, 77]. Nach der Flemingschen Regel, die das Verhältnis zwischen Stromdipol und dazugehörigem Magnetfeld an Daumen und gekrümmter Hand veranschaulicht (siehe auch Abschnitt 4.2.1), würde in diesem Fall ein links-rechts-symmetrisches magnetisches Feld resultieren mit nach außen gehendem magnetischem Fluss (also positiver Polarität) über der rechten Hemisphäre und entsprechend nach innen gehendem magnetischem Fluss (negativer Polarität) über der linken. Ein solches magnetisches Äquivalent des LPP wurde trotz der methodischen Zusammenhänge von EEG und MEG und der Fülle an ERP-Studien zu diesem Thema allerdings erst in 2 kürzlich erschienenen Arbeiten explizit als solches beschrieben: Wessing et al. bezeichnen die während der Verarbeitung emotionaler Bilder (positiv und neutral) bei 8-10jährigen Kindern gemessene Aktivität als LPP-m [79], während Moratti et al. im Rahmen einer Studie zur Wahrnehmung der klassischerweise verwendeten emotionalen Stimuli (positiv/negativ und neutral) aus dem *International Affective Picture System* (IAPS) vom mLPP sprechen [67]. Bei Wessing und Mitarbeitern findet sich obengenannten methodischen, bzw. theoretischen Überlegungen entsprechend ein rechts-positives und links-negatives magnetisches Feld im typischen Zeitbereich des LPP; die entsprechende Abbildung ist einer EEG-Untersuchung zum LPP sind in Abbildung 5 im Abschnitt 2.2.2 einander gegenüber gestellt.

Zusammenfassend sprechen für die Interpretation der hier gemessenen Aktivität nach 400 ms als magnetisches Äquivalent des LPP (mLPP) mehrere Aspekte: Die in dieser Untersuchung gemessene stärkere neuromagnetische Aktivität in Reaktion auf syndyastisch verbundene Gesichter (i) findet seine maximale Ausprägung im Zeitbereich des in inhaltlich vergleichbaren EEG-Untersuchungen beobachteten LPP, nämlich zwischen 400-700 ms [71-73]; (ii) entspricht in seiner regionalen Ausrichtung mit positivem Magnetfeld über der rechten Hemisphäre und negativem über der linken dem nach physikalischen Regeln theoretisch zu erwartenden magnetischen Äquivalent des frontal negativen und posterior-positiven LPP; (iii) ähnelt darüber hinaus in regionaler Ausprägung (fronto-parietaler Sensorencluster) und Morphologie den Ergebnissen der explizit auf die Analyse eines magnetischen Homologs des LPP (LPP-m/mLPP) fokussierten Untersuchungen [67, 79].

Die Interpretation eines solchen Ergebnis erlaubt allerdings keine abschließende Beurteilung; zum einen, weil ein spät nach Präsentation eines Stimulus auftretendes Signal wie das LPP/mLPP Korrelat nicht eines einzelnen und definierten, sondern vielmehr diverser, parallel ablaufender neuraler Prozesse ist und wahrscheinlich mehrere neuronale Generatoren aufweist [58]. Zum anderen lassen sich verschiedene mögliche Determinanten der beobachteten Aktivität unterscheiden: Neben der emotionalen Qualität der Stimuli und der Fülle der darin kodierten kontextuellen Informationen, bedingt durch die spezielle emotionale Verbindung zur dargestellten Person, lassen sich Einflussgrößen wie Attraktivität, Familiarität, Stimulus-Wiederholung und Aufgabenrelevanz (*task-relevance*) unterscheiden. Damit verbunden sind affektive Prozesse ebenso wie kognitive, insbesondere die Modulation von Aufmerksamkeit und Abruf von Gedächtnisinhalten. Schließlich kommen möglicherweise Vorgänge im Rahmen von Imagination und subjektiven, emotionalen Reaktionen hinzu. Nachfolgend sollen zunächst der Verlauf und die Ausprägung der hier gemessenen biomagnetischen Signale in Beziehung zur existenten Literatur sowie die aus der Literatur und den Daten ableitbaren Einflussgrößen diskutiert werden.

6.2.2.1 Dauer und Ausprägung des mLPP im Vergleich zur Literatur.

Die ERP-Komponenten mit einer Latenz >300 ms unterliegen bezüglich ihres Beginns und der Dauer sowie der quantitativen Ausprägung starken Schwankungen. Aus der Literatur (siehe Übersicht von Olofsson et al. [45]) geht die große Variabilität der als LPP bezeichneten ERP-Komponenten hervor. Relativ übereinstimmend sind jedoch positive Polaritätsverschiebungen, die sich zwischen 200-400 ms ausprägen, meistens nach 400 ms ihr Maximum erreichen und in Abgrenzung zur P3b Komponente des P300-Potentials länger anhalten; die P3b-Komponente lässt spätestens zwischen 500-600 ms nach, in der Regel jedoch bereits früher [57]. Im Gegensatz zum LPP sind frühere ERP-Komponenten wie die gesichterspezifischen Signale N170/M170 und auch die P300 durch einen zeitlich begrenzten Peak geprägt, der geringer Variabilität unterliegt oder deren Latenz als Funktion der experimentellen Manipulation variiert. So ist die Latenz der N170 bei Präsentation invertierter, (also auf den Kopf gedrehter) Gesichter verlängert [24]; die Latenz der P300 verlängert sich je nach Schwierigkeit, die präsentierten (visuellen oder akustischen) Stimuli zu klassifizieren und als Target-Stimuli zu identifizieren [56]. Aus dem überlappenden zeitlichen Auftreten von P3b-Komponente der P300 und LPP und der teilweise inhaltlichen Überschneidungen ihrer Korrelate werden die mitunter unscharfe Trennung dieser ERP-Komponenten und damit die inkonsistente Bezeichnung in der Literatur

nachvollziehbar. Hinzu kommen unterschiedliche methodische Ansätze mit je nach Studie unterschiedlicher Präsentationsdauer der Stimuli und Auswahl der Zeitbereiche, die in die (ebenfalls nicht einheitliche) statistische Auswertung einbezogen wurden. Trotz dieser komplexen Vielfalt der Literatur zum LPP ist ein wesentliches und relativ einfaches Kriterium der Unterscheidung zwischen P300-Prozessen und nachfolgendem LPP die manchmal für die gesamte Dauer der Stimuluspräsentation sekundenlang andauernde Aktivität [55].

Die hier beobachtete neuromagnetische Aktivität, die durch das Betrachten des Gesichtes des Partners hervorgerufen wurde, war statistisch signifikant bis 2 s und bis etwa 4-5 s sichtbar. Ab 2 s nahm die Varianz der Daten immer mehr zu, bei Ansicht der individuellen Kurvenverläufe sind unterschiedliche Veränderungen der Polarität zu erkennen, so dass die über die Stichprobe gemittelte Aktivität nach 2 s keine statistisch signifikanten Effekte mehr zeigt. Der deutliche Effekt auf die Feldstärke ähnelt vom zeitlichen Ablauf und maximaler Ausprägung her vor allem den von Studien zur Verarbeitung geliebter Gesichter von Vico et al. [73] und Guerra et al. [71], der Unterschied zwischen den Stimuluskategorien in der Studie von Langeslag ist im Vergleich dazu relativ subtil ausgeprägt [72]. Ebenfalls stark ausgeprägt und lang anhaltend sind Effekte emotionaler Stimuli auf das LPP in der Arbeit von Cuthbert et al. [55], in der allerdings Stimuli mit explizitem emotionalen Inhalt aus dem IAPS-Inventar benutzt wurden. Ebenfalls ähnlich, jedoch mit deutlich kürzerem Verlauf der Aktivität bei allerdings auch unterschiedlichen Stimuli und Präsentationszeiten sind die Ergebnisse der beiden verfügbaren MEG-Untersuchungen zum magnetischen Äquivalent des LPP [67]; insbesondere die Studie von Wessing et al. [79] mit wie in dieser Untersuchung rechts-positivem und links-negativem Fluss; die Ergebnisse von Moratti et al. entsprechen dem, zeigen aber (eventuell aufgrund einer unterschiedlichen Sensorenkonfiguration) eine „umgekehrte“ Polarität. Beide Untersuchungen beschränken sich auf einen Zeitbereich < 1000 ms, bei Wessing et al. bis 600 ms, bei Moratti bis 800 ms Post-Stimulus.

Diese Unterschiede können auf diverse Faktoren bezogen werden. Die geringe Anzahl an MEG-Studien zu späten und lang andauernden Signalen erlaubt keine Rückschlüsse darüber, ob eventuelle methodische Unterschiede wie die im Vergleich zum EEG fokalere Messfähigkeit des MEG und die unterschiedliche Sensitivität auf vertikal oder horizontal orientierte Stromquellen eine Rolle für die starke Ausprägung der Signale spielt. Im Vergleich zwischen den thematisch ähnlichen EEG- und fMRT-Untersuchungen zur Verarbeitung der Gesichter geliebter Personen fallen allerdings die unterschiedlichen experimentellen Anordnungen auf: Während der Großteil der EEG-Studien als Instruktion an die Versuchspersonen lediglich das passive Betrachten

(„*passive viewing*“) oder Beachten („*attending*“) der Stimuli umfasste [71-73, 76] oder den emotional relevanten Reiz als Target-Stimulus in einem entsprechend konstruierten Experiment vorgab [74, 78], wurde in den meisten fMRT-Studien zum Thema explizit aufgefordert, an die entsprechende Person zu denken [81, 83] oder an angenehme, nicht in erster Linie sexuelle, Erfahrungen und Erlebnisse mit dem Partner zu denken [84-86]. Damit zusammenhängend wurde als Ziel formuliert, Emotionen, die typisch für Liebesbeziehungen sind, zu evozieren; die Strategie einer Kombination von Präsentation des Gesichts mit positiv-emotionaler Imagination wurde dafür als besonders effektiv hervorgehoben [85]. Ein ähnliches Vorgehen wurde in keiner der verfügbaren EEG-Studien gewählt, vermutlich auch aufgrund der Schwierigkeit, Imagination als zeitlich variablen Vorgang mit ereigniskorrelierten Potentialen und damit Mittelung vieler Epochen zu messen. Zeitlich „träge“ Methoden wie das fMRT mit verzögert reagierendem BOLD-Signal scheinen dazu eher geeignet zu sein.

Aus mehreren Untersuchungen geht hervor, dass die neuronalen Korrelate des LPP zwar teilweise automatisch ablaufen, aber durch kognitive Kontrolle mitunter stark moduliert werden [62-66]. Es ist also denkbar, dass in Reaktion auf die Stimuluspräsentation mittels *top-down* Modulation Imagination und assoziative Prozesse aufgerufen werden können, die selbst und durch Ausprägung einer subjektiven affektiven Reaktion einen Effekt auf bioelektrische oder -magnetische Signale ausüben können.

6.2.2.2 Affektive Prozesse: Emotion und Motivation.

Affektive Vorgänge spielen mutmaßlich bereits früh während visueller Verarbeitung eine wichtige Rolle [100, 174]; als weitere Dimension der hier beobachteten biomagnetischen Aktivität ist eine subjektive, emotionale Reaktion zu diskutieren, die möglicherweise bereits früh zwischen 300-600 ms beginnen könnte [175, 176]. Nach António Damásio sog. „*emotional kompetente*“ (zitiert nach [176]) Stimuli haben das Potential, subjektive Gefühlszustände auszulösen [122]. Gesichter per se gelten an sich nicht als besonders potente Stimuli, wobei sich diese Unterscheidung wiederum auf explizit dargestellte emotionale Inhalte bezieht. Bindungstypische Gefühle können theoretisch durch eine Vielzahl von Reizen prinzipiell jeder sensorischen Modalität ausgelöst werden; die überwiegende Anzahl der Studien zur Neurobiologie von Bindung basiert interessanterweise auf der visuellen Stimulation durch Gesichter [71-73, 81, 83-86]. Eine Untersuchung jedoch konnte auch zeigen, dass bereits die subliminale Präsentation des Namens eines Partners oder eines Freundes ein entsprechend

distinktes Muster an Hirnaktivität in motivationalen (dopaminergen) Netzwerken produzierte [166].

Indem Gesichter von Personen, zu denen ein enges Verhältnis besteht, eine Fülle an implizit kodierten emotionalen Informationen und Assoziationen vermitteln, können sie in dieser Hinsicht durchaus als „emotional kompetent“ gelten, wenn auch dieses Potential nicht vergleichbar gut kontrollierbar ist wie das standardisierter Sets mit emotionalen Stimuli, die häufig in Emotionsstudien eingesetzt werden. Das Potential, affektive Reaktionen zu evozieren, entsteht durch die Assoziationen, die das Gesicht als Signal auslöst; die emotionale Dimension eines solchen Stimulus liegt vor allem in der mentalen Repräsentation der anderen Person. Hierfür ist der Unterschied zwischen passiver Wahrnehmung von Gesichtern oder Wahrnehmung mit begleitend damit assoziierter Imagination evident. Aufgrund des geringen Kenntnisstandes zum Zeitverlauf des Generierens von Visualisierung und Imagination sowie der Entstehung affektiver Zustände ist schwer zu beurteilen, ob ein Teil der hier gemessenen Aktivität mit Prozessen dieser Art korreliert. Einige verfügbare Studien legen jedoch nahe, dass Visualisieren und Imagination bereits sehr früh elektrophysiologische Signale produzieren [94] und insbesondere darauffolgende Signale beeinflussen [95, 96].

Weiterhin ist es auch denkbar, dass während der Phase zwischen 400-700 ms, in der mutmaßlich der emotionale Inhalt der Stimuli evaluiert wird, bereits eine subjektive affektive Reaktion beginnt, die mit der bis in den Sekundenbereich fortgesetzten differentiellen neuromagnetischen Aktivität korreliert. Die Schwierigkeit und Limitation der Interpretation lang andauernder Signale liegt dabei in der abnehmenden Koppelung an die Präsentation eines Sinnesreizes und die Überlagerung diverser parallel ablaufender neuronaler Prozesse. Die Studien von Rudrauf und Mitarbeitern [176] und Esslen und Mitarbeitern [175] zu diesem Thema legen jedoch einen ähnlichen zeitlichen Verlauf, bzw. Beginn der emotionalen Response nahe. In diesem Sinne können auch Studien interpretiert werden, in denen parallel zum EEG psychophysische Marker einer emotionalen Reaktion (Herzfrequenz, Hautwiderstand, Zygomaticus-EMG) aufgezeichnet wurden [50, 55, 128] und hier im Vergleich jeweils die deutlichste Reaktion in Reaktion auf das Gesicht des Partners beobachtet wurde [71, 73, 75]. Für die Ergebnisse dieser Studie liegen periphere physiologische Daten jedoch nicht vor, so dass dieser Zusammenhang nicht weiter untersucht werden kann.

Aus den verfügbaren Daten kommen diesbezüglich nur die nach Stimuluspräsentation gegebene Bewertung der Versuchspersonen über das Ausmaß der emotionalen Imagination und eine Korrelation mit den Ergebnissen der psychometrischen Untersuchung in Betracht. Die

Ausprägung der gemessenen Signale zeigte in der Vorverarbeitung der Daten jedoch keinen Zusammenhang mit dem von den Versuchspersonen nach jeder Stimuluspräsentation abgegebenen Bewertung. Da diese Bewertung mittels Anzahl von Mausklicks sicherlich ein schwaches Maß darstellt, widerlegt der fehlende Zusammenhang eine zugrunde liegende emotionale Reaktion nicht, kann diese Annahme aber auch nicht weiter unterstützen.

Die Auswertung der psychometrischen Untersuchung gibt diesbezüglich weitere Informationen: Aufgrund der psychometrischen Ergebnisse kann postuliert werden, dass in der Stichprobe zwischen den Probanden/innen eine starke Bindung und hohe Bindungszufriedenheit existent ist. Die positive Korrelation der neuromagnetischen Aktivität mit der Subskala „Partnerschaft“ des FA-SEB ist ein Hinweis auf eine Assoziation der verstärkten biomagnetischen Reaktion auf die Präsentation des Partners mit bindungstypischen Prozessen. Die Subskala „Partnerschaft“ bildet von allen psychometrischen Daten das vermutete Muster syndyastischer Empfindungen am meisten ab. Ein weiterer Hinweis auf einen solchen Zusammenhang ist die positive Korrelation des MEG-Signals mit der Dauer der Beziehung. Es muss dabei betont werden, dass diese Korrelationen lediglich Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang bieten; ein robuster statistischer Zusammenhang würde sich in einer Auswertung der gesamten Stichprobe zeigen. Andererseits wurde die Subgruppe, in der sich die signifikante Korrelation zeigt, auf Grundlage der MEG-Daten ausgewählt, die nicht berücksichtigten Datensätze unterschieden sich in den Summenscores der Fragebögen nicht von den übrigen. Die verwendeten Fragebögen fokussieren allerdings auf partnerschaftliche emotionale und sexuelle Erfahrungen und Verhaltensweisen und dienen dadurch vielleicht nicht ausreichend dem Vergleich zwischen den Stimuluskategorien, da die freundschaftliche Beziehung zu den auf den weiteren Bildern gezeigten Personen nicht in gleichem Maße psychometrisch untersucht und vergleichbar gemacht wurde. Hinzu kommt, dass eine Korrelation zwischen psychometrischen und elektrophysiologischen Daten eher selten verwendet werden; anders als bei Untersuchungen mittels funktioneller Bildgebung. Insbesondere bei späten und lang anhaltenden Signalen liegt ein Problem darin, dass diese Signale die Aktivität verschiedener Quellen und damit auch (mutmaßlich) unterschiedlicher neurophysiologischer Prozesse reflektiert [57, 58].

Zusammenfassend unterstützen die beschriebenen Effekte von visuellen Reizen mit hoher emotionaler und motivationaler Relevanz auf biomagnetische Signale im Zeitbereich des LPP (mLPP) die Interpretation der hier gemessenen Aktivität als neuromagnetisches Äquivalent dieser bislang fast ausschließlich mit EEG aufgezeichneten Signale. Die evaluativen Prozesse, die der Aktivität im Zeitbereich des LPP zugrunde gelegt werden, beziehen sich nicht exklusiv

auf eine einzelne Qualität des wahrgenommenen Reizes. Aus der Korrelation der hier gemessenen Aktivität mit der die partnerschaftliche Erfüllung erfassenden Subskala des FA-SEB ergibt sich allerdings eine Assoziation mit Prozessen, die durch die spezifische und exklusive Qualität des syndyastischen Stimulus bedingt sind. Die Ergebnisse bestätigen in dieser Hinsicht EEG- [71-73] sowie fMRT-Untersuchungen [81, 85], die eine spezifische Reaktion auf die Präsentation des Gesichtes der Partner beobachten und auf affektive Prozesse im Zusammenhang mit der einzigartigen emotionalen und motivationalen Bedeutung für das Individuum beziehen. Die qualitative Besonderheit der partnerschaftlichen Bindung ist dabei sowohl in langjährigen [84] als auch sehr frühen [86] Stadien von gleichermaßen hetero- und homosexuellen [83] Beziehungen in einer spezifischen neuronalen Reaktion reflektiert.

6.2.2.3 Kognitive Prozesse: Aufmerksamkeit und Gedächtnis.

Die späte Komponente der elektrophysiologischen Reaktion auf emotionale Stimuli wird, anders als die Modulation früher ERPs, nicht ausschließlich auf den expliziten affektiven Kontext des visuellen Stimulus bezogen, sondern korreliert mit der Evaluation der motivationalen und emotionalen Signifikanz dieses Stimulus [49, 52, 55]. Das LPP wird häufig als Korrelat des infolge der aversiven oder appetitiven Valenz emotionaler Stimuli ausgelösten *arousals* sowie Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozessen im Vergleich zu neutralen Reizen interpretiert [55]. Noch deutlicher ist die Assoziation mit kognitiven Prozessen für das P300-Potential und den dazugehörigen Komponenten P3a und P3b, die dem LPP in der Regel vorausgehen. Das P300-Potential wird in der Regel als ein früher Aufmerksamkeitsprozess interpretiert, der mittels geeigneter experimenteller Paradigmen (Oddball-Paradigma mit 3 Stimuluskategorien: Target, Non-Target, Distraktor; bzw. Go/No-Go Experimente) in 2 Komponenten differenziert werden kann; die frontale und mit Arbeitsgedächtnis assoziierte P3a und die etwas spätere und länger anhaltende temporo-parietale und mit semantischem Gedächtnis korrelierte P3b [56, 57]. Wesentlicher Faktor für das Entstehen des P300-Potentials ist die Stimulusdiskrimination und entsprechende Anpassung attentionaler Ressourcen bei sich veränderndem Stimulus-Kontext. Insofern ist auch für diese Untersuchung von entsprechenden kognitiven Prozessen auszugehen, die zur magnetischen Aktivität besonders zwischen 200-400 ms beitragen. Bekannte Gesichter lösen neben der Entschlüsselung der Identität und in Mimik oder Blickrichtung kodierten Informationen den Abruf semantischen und kontextuellen Wissens zur Person aus [14]; das Erkennen eines Gesichts inklusive Abruf semantischen Wissens zur Person produziert eine verstärkte elektrische Aktivität an frontalen Elektroden zwischen 250-500 ms während das bloße

Wiedererkennen eines zuvor gelernten Gesichts ohne dass weiteres Wissen zur Person vorliegt, etwas spätere und eher parietal lokalisierte Signale hervorruft [69, 70].

Es ist bekannt, dass ein Stimulus unabhängig von der experimentellen Aufgabe eine motivationale Relevanz bekommen kann, indem er durch das experimentelle Design hervorgehoben wird: Dieser Effekt wird als Aufgabenrelevanz (*task relevance*) bezeichnet und beruht auf der methodischen Fokussierung der Aufmerksamkeit der Probanden/innen auf einen Stimulus im Rahmen der Versuchsanordnung [50, 56, 78]. Ohne dass die Teilnehmer detailliert über die zugrunde liegenden Hypothesen informiert wurden, wurde natürlich allein durch die Thematik Bindung in der Probandeninformation verstärkte Aufmerksamkeit auf das Bild des Partners als Hauptstimulus gerichtet, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein entsprechender Einfluss (*Bias*) vorhanden war. So ist es möglich, dass während des Experiments das Bild des Partners als Target-Stimulus wahrgenommen wurde und allein dadurch verstärkt ins Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt ist. Dazu beitragen könnte eine individuell unterschiedlich empfundene Schwierigkeit, bei Präsentation der entsprechenden Stimuli eine partnerschaftliche oder freundschaftliche Situation zu assoziieren. In Bezug auf die Aufgabenrelevanz kann nicht weiter differenziert werden, in welchem Maße sie die hier gemessene Aktivität direkt oder nur teilweise bedingt.

Die Phase zwischen 200-400, also vor Ausprägung des mLPP, wiederum ist bereits durch eine Differenz der Stimuluskategorien geprägt, die aufgrund der in Bezug auf das spätere Signal umgekehrten Polarität stark an die *early posterior negativity* (EPN), bzw. das magnetische Korrelat (EPNm) [168] denken lässt. Diese ERP-Komponente wird als Korrelat einer selektiven visuellen Aufmerksamkeit in Reaktion auf emotionale Reize im Stadium der Stimulusdiskrimination interpretiert [50] und hängt wiederum eng mit der N2-Komponente zusammen, die mit kognitiver Kontrolle im Zusammenhang mit dem P300-Potential assoziiert wird [51]. Beide Dimensionen, also emotionale Stimuluseigenschaften (wenn auch implizit kodiert) und kognitive Kontrolle beim Aufrufen der Imagination können in dieser Untersuchung eine Rolle gespielt haben und damit zum Signalverlauf mit abgrenzbarer EPNm-Komponente geführt haben.

Aus diesen Arbeiten kann geschlossen werden, dass kognitive Prozesse in Form einer Modulation von Aufmerksamkeit und Gedächtnis für die Entstehungsphase der hier gemessenen Aktivität wahrscheinlich eine Rolle spielen. Dabei spielen der Abruf von Gedächtnisinhalten ebenso wie unterschiedliche Allokation von Aufmerksamkeit eine Rolle; durch die prominente Qualität des Gesichts des Partners an sich als auch durch die Versuchsanordnung bekommt

dieses eine erhöhte Relevanz, die sich auf die neuromagnetische Aktivität im Zeitbereich des P300-Potentials, also weitgefasst zwischen 200-500 ms [57], auswirken kann. Das erhöhte Maß an vorhandenem kontextuellen und semantischen Wissen zur Person des Partners geht durch Gedächtnisprozesse in die gemessene Aktivität mit ein, vergleichbar mit der P3b-Komponente des P300-Potentials und den Beobachtungen von Voss et al. und Bobes et al. [69, 70]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich jedoch nicht erschöpfend auf rein kognitive Prozesse beziehen; gegen eine solche Annahme spricht bereits die längere Dauer der gemessenen Aktivität, die sich daher auf das LPP beziehen lässt und untypisch auch für P3b-Prozesse ist [56, 57]. Das LPP wiederum ist sowohl mit emotionalen als auch kognitiven Prozessen assoziiert und weist neben automatisch generierter Aufmerksamkeit auch deutliche Einflüsse mentaler Kontrolle auf [62-65]. Es lassen sich dabei sowohl eine automatische und eher aufgabenspezifische als auch mehr inhaltsbezogene Modulation der späten Signale nachweisen [61, 75, 78], die ebenfalls auf eine Kombination von kognitiven und affektiven Determinanten der späten und lang anhaltenden Signale hinweisen.

6.2.2.4 Stimuluseigenschaften als Determinanten des mLPP.

Neben der in der spezifischen Form der syndyastischen Beziehung begründeten emotionalen und motivationalen Komponente und dem ausgeprägten Wissen zur Person, durch welche die als Korrelat des P300-Potential und LPP angesehenen affektiven und kognitiven Prozesse mitunter ausgelöst werden, sind in den besonderen Eigenschaften der Stimuli weiteren potentielle Einflussgrößen zu finden.

Ein wesentlicher Faktor ist die mutmaßlich bei den Probanden/innen als höher bewertete Attraktivität des Partners als schwer zu kontrollierender Einfluss; selbst wenn unabhängig als attraktiv beurteilte Gesichter als Kontrollstimuli gezeigt werden, wird die subjektiv empfundene Attraktivität des Partners vermutlich immer höher sein und untrennbar ein Teil der Empfindungen sein, die das Gesicht des Partners auslöst. Diese Form der Attraktivitätswahrnehmung unterscheidet sich durch die Vermischung von individuellen Faktoren wahrscheinlich auch maßgeblich vom eher unbeteiligten ästhetischen Urteil, das in Form eines Ratings über ein persönlich unbekanntes Gesicht abgegeben wird. Jedenfalls muss Attraktivität als weitere Einflussgröße auf das mLPP angenommen werden; hierfür spricht der Befund, dass Attraktivität als positive Eigenschaft eines Gesichtes im Vergleich zu weniger und nicht attraktiven die elektroфизиologische Aktivität zwischen 400-700 ms moduliert [59, 172] und zu verstärkter Aktivität in subkortikalen Belohnungsarealen führt [108, 109]. Anders als in

einigen Untersuchungen [107, 172] besteht in der hier gemessenen Aktivität zwischen 400-700 ms keine vom Geschlecht der Versuchsperson abhängige Differenz. Da allerdings keine vergleichenden Bewertungen bezüglich der Attraktivität der gezeigten Gesichter dokumentiert wurden, kann der mutmaßliche Effekt eines Kontrastes zwischen unterschiedlich attraktiv empfundenen Gesichtern nicht weiter aufgeklärt werden. Allerdings ist es aufgrund der komplexen Vielfalt von Faktoren, die das Gesicht des Partners im Gegensatz zu befreundeten Personen zu einem besonderen visuellen Stimulus machen, unwahrscheinlich, dass Attraktivität als singulärer Faktor die Evaluation der präsentierten Gesichter dominiert; zudem wurde weder im Versuchsaufbau oder durch die Versuchsanweisungen die Aufmerksamkeit der Probanden/innen verstärkt auf die Attraktivität der Gesichter gelenkt [173]. Differenzierte Aufmerksamkeit bezüglich bestimmter, emotional relevanter Eigenschaften der Stimuli spielt eine wesentliche Rolle für Signale im späteren Zeitbereich [50]. Hinzu kommt, dass es sich um bekannte, attraktive Gesichter handelt und damit das Ausmaß der Evaluation hinsichtlich Attraktivität bereits geringer ist als bei neuen und unbekanntem Gesichter, die in den entsprechenden Untersuchungen verwendet wurden [59, 173]. Wahrscheinlicher ist es, dass die unbewusste Wahrnehmung und Beurteilung von Attraktivität eine wesentliche Rolle für die Entstehung der fraglichen Signale spielt, diese aber nicht alleine bedingt. Unbekannt ist dabei allerdings, ob und in welchem Maße Familiarität und Attraktivität interagieren, ob also bekannte Gesichter ebenso wie neu präsentierte in Bezug auf Attraktivität evaluiert werden (es wäre zu erwarten, dass dies nicht der Fall ist).

Aufgrund der Mehrdimensionalität menschlicher Sexualität können bei der Interpretation der durch das Betrachten des Gesichts des Partners ausgelösten Empfindungen syndyastische Gefühle von Nähe und Vertrauen nicht prinzipiell von erotischer Attraktion oder, je nach Art der Beziehung, auch Ärger und Ablehnung separiert werden. In den Instruktionen vor der Messung wurde zwar auf eine nicht primär sexuelle Situation verwiesen, die von den Probanden/innen assoziiert werden sollte, es kann natürlich dennoch nicht ausgeschlossen werden, dass die verstärkte Reaktion mehr auf einem sexuellen Kontext des partnerschaftlichen Gesichtes beruht. Explizit erotische Bilder werden häufig als positiv-emotionale Stimuli mit hohem Potential an *arousal* in standardisierten Stimulusinventaren (wie dem bereits genannten IAPS) verwendet und produzieren verstärkte Reaktionen im fraglichen Zeitbereich des LPP [45, 177]. Aufgrund des mehrdimensionalen Charakter einer syndyastischen Beziehung [1, 7] und der experimentellen Anordnung ist es realistisch, eine Relevanz sowohl für einen erotischen Kontext, den das Gesicht des Partners signalisiert als auch syndyastische Faktoren anzunehmen, die in der differenzen

neuromagnetischen Aktivität reflektiert wird. Gegen die Annahme, dass sexuelle Attraktion der entscheidende, wesentliche Faktor ist, spricht schließlich der große Unterschied, der zwischen der Verarbeitung explizit-erotischer Bilder und Gesichtern, die mit einer (unter anderen Empfindungen) sexuellen Beziehung assoziiert werden, besteht. Für eventuell ausgelöste negative Emotionen ergab die ausführliche psychometrische Untersuchung, die mittels FSEV ausführlich verschiedene Bereiche der Beziehung umfasste, keine Hinweise.

6.2.2.5 Zusammenfassung der diskutierten Einflussgrößen des mLPP

Emotion und Motivation sind Dimensionen, die für sexuelles Verhalten einen hohen Stellenwert besitzen [7], man kann also von einer hohen emotionalen und motivationalen Signifikanz von Sinnesreizen ausgehen, die mit einem syndyastisch und/oder sexuell relevanten Partner verknüpft werden. Aufgrund der verfügbaren elektrophysiologischen Literatur zu späten und lang andauernden Signalen bestehen damit starke Hinweise, dass diese implizit kodierten Eigenschaften ausschlaggebend für sowohl kognitive Prozesse mit Einfluss auf Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Evaluation der Stimuli als auch affektive Prozesse in Reaktion auf syndyastische Empfindungen sind, die mit dem hier beobachteten magnetischen Äquivalent des LPP (mLPP) korrelieren. Durch emotionale Imagination könnten diese neuronalen Prozesse zudem moduliert werden. Es erscheint plausibel, als wesentlichen Faktor die höhere emotionale und motivationale Relevanz des syndyastisch bedeutsamen Stimulus anzunehmen. Weitere Einflussgrößen wie höhere Attraktivität und Vertrautheit des partnerschaftlichen Gesichtes können ebenfalls eine Rolle spielen, erzeugen aber nach Beschreibung in der Literatur keine so starken Effekte wie die hier beobachteten und können diese auch nicht ausschließlich erklären.

6.2.3 Potentielle Lokalisierung der zugrunde liegenden Strukturen

Da der Fokus dieser Dissertation auf der Untersuchung der Veränderung der magnetischen Felder auf Sensoren-Ebene, also mittels Zeitkurven ist, wurden keine weiteren Prozeduren zur Lokalisierung der zugrunde liegenden magnetischen Dipole unternommen. Die hier beobachtete neuromagnetische Aktivität zwischen 200-2000 ms mit Maximum zwischen 400-700 ms war in Gruppen von Sensoren zu sehen, die eher fronto-parietal und zentral orientiert waren. Auch die *difference maps* zeigen eine Ausdehnung der zwischen den Stimuluskategorien differenzierenden magnetischen Aktivität über fronto-parietalen Regionen. Damit ähnelt die Verteilung des mLPP den wenigen verfügbaren MEG-Arbeiten zum magnetischen Äquivalent des LPP [67, 79].

Als Quelle der Aktivität wird bei Moratti et al. ein bidirektional verknüpftes Netzwerk zwischen dem rechten präfrontalen Kortex und bilateralen okzipito-parietalen Kortex als Korrelat von visueller Verarbeitung und *top-down* Modulation beschrieben [67]. Dies deckt sich teilweise mit Ergebnissen aus kombinierter EEG- und fMRT-Untersuchung [80]. Die gesteigerte Aufmerksamkeit, die verstärkt auf emotionale Reize orientiert wird, beruht möglicherweise auf der Modulation noradrenerger Transmission aus kortikalen Projektionen aus dem Locus coeruleus [47]; dies wird auch im Zusammenhang mit der gedächtnisassoziierten P3b-Komponente des P300-Potentials diskutiert [56]. Der neuronale Generator der P300-Subkomponenten liegt in Lokalisations-Untersuchungen für P3a im frontalen, zingulären und rechts-parietalen Kortex und für P3b in mehr temporo-okzipital gelegenen Strukturen [57].

Während die als M100 oder M170 definierten Signale relativ gut im Gyrus fusiformis und benachbarten okzipito-temporalen Strukturen lokalisiert werden können [17, 18, 42, 178], nimmt die Verarbeitung visueller Reize in späteren Stadien an Komplexität zu und basiert auf zeitlich paralleler, konzertierter Aktivität mehrerer kortikaler und subkortikaler Strukturen, die als distribuiertes Netzwerk funktionieren [13, 16, 18, 20]. Temporale und parietale Strukturen spielen als Anteile des sog. *extended system* nach Haxby und Mitarbeitern [13] eine Rolle für die Analyse der varianten Aspekte von Gesichtern wie Mimik, Blickrichtung oder emotionstypische Expressionen [15, 27, 28] und könnten im Sinne der Evaluation visueller Informationen an der Entstehung der Signale zwischen 400-700 ms beteiligt sein [16, 18]. In den Zeitbereich 200-500 ms fallen schließlich auch elektrophysiologisch gemessene Reaktionen im temporalen Kortex, im Hippocampus und parahippocampalen Kortex [16], die ebenfalls im Rahmen der Evaluation visueller Reize und dem Abruf von Gedächtnisinhalten zur hier gemessenen Aktivität beitragen könnten.

Die Bildgebungs-Studien zur Neurobiologie von Bindung schließlich beschreiben ein charakteristisches Muster von Aktivierungen und Deaktivierungen subkortikaler und kortikaler Strukturen. Wegen der methodischen Limitationen der MEG in Bezug auf subkortikale Quellen muss davon ausgegangen werden, dass die hier gemessenen Signale neokortikalen Ursprungs sind [157-159]. Subkortikale Areale sind aufgrund der Entfernung vom Sensor und der Überlagerung mehrerer Quellen schwierig mit MEG zu erfassen; hinzu kommt, dass beispielsweise der Amygdaloid-Komplex aufgrund seiner Anatomie mit einem geschlossenen Kernkomplex keinen direkt messbaren elektrischen Dipol produziert [67]. Eine subjektive affektive Reaktion auf emotional relevante Stimuli, die bereits zwischen 300-500 ms beginnen könnte [174-176] wurde mit neuronaler Aktivität in temporalen, frontalen und weiteren

kortikalen Strukturen wie dem postzentralen Sulcus und Insula verknüpft [122, 124, 179], die möglicherweise zu der beobachteten Aktivität beitragen.

Aufgrund der generell aufgrund des Inversen Problems schwierigen Lokalisierung elektromagnetischer Aktivität und der methodisch bedingten, geringen Sensitivität für subkortikale Quellen bleiben Extrapolationen zur Lokalisierung der hier gemessenen Aktivität mit Ausnahme der gut untersuchten und gesichterspezifischen M170 [23, 178] letztlich aber spekulativ.

6.3 Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Studie demonstriert, dass die Präsentation des Gesichts des Beziehungspartners eine signifikant differente neuromagnetische Aktivität über einen längeren Zeitbereich hervorruft. Aus diesem Ergebnis können mehrere Hypothesen abgeleitet und mit geeigneten experimentellen Paradigmen überprüft werden. Da es sich hier um die erste Messung der neuromagnetischen Äquivalente der Verarbeitung bindungstypischer Reize handelt, sollten die Ergebnisse mittels weiterentwickelter Ansätze repliziert, bzw. ergänzt werden. Der Charakter einer Pilotstudie limitiert natürlich auch die Generalisierbarkeit der hier beschriebenen Resultate und betont ihre zum Teil deskriptive Natur.

Die durchgeführte psychometrische Untersuchung der Stichprobe erhebt nicht den Anspruch, alle denkbaren Einflussfaktoren erfassen zu können. In Bezug auf weitere Untersuchungen sollten diese inhaltlich erweitert, bzw. konkretisiert werden, um gleichzeitig das Ausmaß der Testung im sinnvollen Maß zu halten. Vor allem um eventuelle Einflussgrößen wie die Familiarität oder Attraktivität der präsentierten Gesichter kontrollieren zu können, sollten solche Faktoren separat für die benutzten Stimuli durch Ratings erfasst werden. Generell sollte mit psychometrischen Methoden versucht werden, über alle Stimuluskategorien zusätzliche und vergleichbare Informationen zu erhalten. Inhaltliche Erweiterungen könnten auch Wechselwirkungen, bzw. Überschneidungen oder Differenzen von Perzeption und Imagination betreffen.

Aus den komplementären Eigenschaften von EEG und MEG könnten mittels simultaner EEG- und MEG-Messung weitere Informationen zum elektrokortikalen LPP und des magnetischen Äquivalents (mLPP) gewonnen werden. Die Messungen könnten mit Verfahren zur anatomischen Lokalisierung des Ursprungs der neuromagnetischen Signale, z.B. einer kernspintomographischen Aufnahme kombiniert werden, um Aufschluss über die beteiligten

neuroanatomischen Strukturen zu erhalten. Eine interessante inhaltliche Erweiterung könnte mittels geeigneter Versuchsanordnungen auf unterschiedliche und überlappende Prozesse im Rahmen von Wahrnehmung und Imagination abzielen. Ein Vorteil der MEG zum Studium affektiver Prozesse ist neben der exakten zeitlichen Auflösung auch die Möglichkeit, eine zur Messung subtiler emotionaler Reaktionen vorteilhafte intime und ruhige Atmosphäre herstellen zu können. Durch technischen Fortschritt der MEG-Systeme und Auswertestrategien könnte es außerdem möglich sein, mittels MEG Informationen über subkortikale Strukturen zu erhalten. Dabei wäre der Ablauf neuronaler Erregung im allerdings elektrophysiologisch schwer zugänglichen Amygdaloid-Komplex von besonderem Interesse. Messungen im 304-Kanal-Vektormagnetometer im neuen magnetischen Abschirmraum der PTB (BMSR II, *Berlin magnetically shielded room II*) könnten zu diesen Fragen eventuell Aufschluss geben.

Interessante Erweiterungen der Fragestellung könnten die im Grundlagenteil referierten neuroendokrino-logische Faktoren einbeziehen, z.B. die Applikation von Oxytocin vor der Messung. Es könnten außerdem eventuell weitere sensorische Modalitäten einzeln oder kombiniert als experimentelle Stimuli eingesetzt werden. Weiterhin könnte es möglich sein, die neurobiologische Grundlage von Störungen der sexuellen Präferenz mittels eines weiter entwickelten Ansatzes zu erforschen und daraus diagnostische Anwendungen oder Möglichkeiten zum Nachweise von Therapieeffekten zu entwickeln.

7 Literaturverzeichnis

1. Beier KM, Bosinski HAG, Loewit K, *Sexualmedizin. Grundlagen und Praxis*. 2nd ed., München und Jena, Germany: Elsevier, Urban und Fischer, 2005.
2. Grossmann KE, Grossmann K, *John Bowlby, Mary Ainsworth und die Grundlagen der Bindungstheorie*. 1st ed., Stuttgart, Germany: Klett-Cotta, 2003.
3. Harlow H, *The Nature of Love*. *American Psychologist* 1958; **13**:673-685.
4. Hazan C, Shaver P, *Romantic love conceptualized as an attachment process*. *J Pers Soc Psychol* 1987; **52**(3):511-24.
5. Clutton-Brock TH, *Mammalian mating systems*. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 1989; **236**(1285):339-72.
6. Jankowiak WR, Fischer EF, *A cross-cultural perspective on romantic love*. *Ethnology* 1992; **31**(2):149-155.
7. Fisher H, *Lust, attraction, and attachment in mammalian reproduction*. *Human Nature* 1998; **9**(1):23-52.
8. Buss DM, Schmitt DP, *Sexual strategies theory: an evolutionary perspective on human mating*. *Psychol Rev* 1993; **100**(2):204-32.
9. Filipp S-H, Aymanns P, *Bewältigungsstrategien (Coping)*, in Adler RH, et al., eds. *Psychosomatische Medizin. Modelle ärztlichen Denkens und Handelns*. 6th ed. München: Urban und Schwarzenberg, 2003:297-310.
10. House JS, Landis KR, Umberson D, *Social relationships and health*. *Science* 1988; **241**(4865):540-5.
11. Adolphs R, *Cognitive neuroscience of human social behaviour*. *Nat Rev Neurosci* 2003; **4**(3):165-78.
12. Bruce V, Young A, *Understanding face recognition*. *Br J Psychol* 1986; **77** (Pt 3):305-27.
13. Haxby JV, Hoffman EA, Gobbini MI, *Human neural systems for face recognition and social communication*. *Biol Psychiatry* 2002; **51**(1):59-67.

14. Gobbini MI, Haxby JV, *Neural systems for recognition of familiar faces*. Neuropsychologia 2007; **45**(1):32-41.
15. Allison T, Puce A, McCarthy G, *Social perception from visual cues: role of the STS region*. Trends Cogn Sci 2000; **4**(7):267-278.
16. Barbeau EJ, Taylor MJ, Regis J, et al., *Spatio temporal dynamics of face recognition*. Cereb Cortex 2008; **18**(5):997-1009.
17. Halgren E, Raij T, Marinkovic K, Jousmaki V, Hari R, *Cognitive response profile of the human fusiform face area as determined by MEG*. Cereb Cortex 2000; **10**(1):69-81.
18. Henson RN, Goshen-Gottstein Y, Ganel T, et al., *Electrophysiological and haemodynamic correlates of face perception, recognition and priming*. Cereb Cortex 2003; **13**(7):793-805.
19. Kanwisher N, Yovel G, *The fusiform face area: a cortical region specialized for the perception of faces*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2006; **361**(1476):2109-28.
20. Ishai A, *Let's face it: it's a cortical network*. Neuroimage 2008; **40**(2):415-9.
21. Damasio AR, Damasio H, Van Hoesen GW, *Prosopagnosia: anatomic basis and behavioral mechanisms*. Neurology 1982; **32**(4):331-41.
22. Ellis HD, Lewis MB, *Capgras delusion: a window on face recognition*. Trends Cogn Sci 2001; **5**(4):149-156.
23. Liu J, Harris A, Kanwisher N, *Stages of processing in face perception: an MEG study*. Nat Neurosci 2002; **5**(9):910-6.
24. Bentin S, Allison T, Puce A, Perez E, McCarthy G, *Electrophysiological Studies of Face Perception in Humans*. J Cogn Neurosci 1996; **8**(6):551-565.
25. Downing P, Liu J, Kanwisher N, *Testing cognitive models of visual attention with fMRI and MEG*. Neuropsychologia 2001; **39**(12):1329-42.
26. Adolphs R, *Neural systems for recognizing emotion*. Curr Opin Neurobiol 2002; **12**(2):169-77.
27. Bonda E, Petrides M, Ostry D, Evans A, *Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion*. J Neurosci 1996; **16**(11):3737-44.

28. Puce A, Allison T, Bentin S, Gore JC, McCarthy G, *Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements*. J Neurosci 1998; **18**(6):2188-99.
29. Phillips ML, Drevets WC, Rauch SL, Lane R, *Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception*. Biol Psychiatry 2003; **54**(5):504-14.
30. Blakemore SJ, Decety J, *From the perception of action to the understanding of intention*. Nat Rev Neurosci 2001; **2**(8):561-7.
31. Frith CD, Frith U, *Interacting minds--a biological basis*. Science 1999; **286**(5445):1692-5.
32. Carr L, Iacoboni M, Dubeau MC, Mazziotta JC, Lenzi GL, *Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas*. Proc Natl Acad Sci U S A 2003; **100**(9):5497-502.
33. Eimer M, Holmes A, *Event-related brain potential correlates of emotional face processing*. Neuropsychologia 2007; **45**(1):15-31.
34. Allison T, Puce A, Spencer DD, McCarthy G, *Electrophysiological studies of human face perception. I: Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli*. Cereb Cortex 1999; **9**(5):415-30.
35. Kawasaki H, Kaufman O, Damasio H, et al., *Single-neuron responses to emotional visual stimuli recorded in human ventral prefrontal cortex*. Nat Neurosci 2001; **4**(1):15-6.
36. Vuilleumier P, Pourtois G, *Distributed and interactive brain mechanisms during emotion face perception: evidence from functional neuroimaging*. Neuropsychologia 2007; **45**(1):174-94.
37. Eimer M, *Event-related brain potentials distinguish processing stages involved in face perception and recognition*. Clin Neurophysiol 2000; **111**(4):694-705.
38. Kloth N, Dobel C, Schweinberger SR, et al., *Effects of personal familiarity on early neuromagnetic correlates of face perception*. Eur J Neurosci 2006; **24**(11):3317-21.
39. Taylor MJ, George N, Ducorps A, *Magnetoencephalographic evidence of early processing of direction of gaze in humans*. Neurosci Lett 2001; **316**(3):173-7.
40. Pizzagalli DA, Lehmann D, Hendrick AM, et al., *Affective judgments of faces modulate early activity (approximately 160 ms) within the fusiform gyri*. Neuroimage 2002; **16**(3 Pt 1):663-77.

41. Lueschow A, Sander T, Boehm SG, et al., *Looking for faces: Attention modulates early occipitotemporal object processing*. *Psychophysiology* 2004; **41**(3):350-60.
42. Monroe JF, Griffin M, Pinkham A, et al., *The fusiform response to faces: Explicit versus implicit processing of emotion*. *Hum Brain Mapp* 2011.
43. Puce A, Allison T, McCarthy G, *Electrophysiological studies of human face perception. III: Effects of top-down processing on face-specific potentials*. *Cereb Cortex* 1999; **9**(5):445-58.
44. Schupp HT, Flaisch T, Stockburger J, Junghofer M, *Emotion and attention: event-related brain potential studies*. *Prog Brain Res* 2006; **156**:31-51.
45. Olofsson JK, Nordin S, Sequeira H, Polich J, *Affective picture processing: an integrative review of ERP findings*. *Biol Psychol* 2008; **77**(3):247-65.
46. Bradley MM, Hamby S, Low A, Lang PJ, *Brain potentials in perception: picture complexity and emotional arousal*. *Psychophysiology* 2007; **44**(3):364-73.
47. Codispoti M, Ferrari V, Bradley MM, *Repetition and event-related potentials: distinguishing early and late processes in affective picture perception*. *J Cogn Neurosci* 2007; **19**(4):577-86.
48. De Cesarei A, Codispoti M, *When does size not matter? Effects of stimulus size on affective modulation*. *Psychophysiology* 2006; **43**(2):207-15.
49. Schupp HT, Ohman A, Junghofer M, et al., *The facilitated processing of threatening faces: an ERP analysis*. *Emotion* 2004; **4**(2):189-200.
50. Schupp HT, Stockburger J, Codispoti M, et al., *Selective visual attention to emotion*. *J Neurosci* 2007; **27**(5):1082-9.
51. Folstein JR, Van Petten C, *Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review*. *Psychophysiology* 2008; **45**(1):152-70.
52. Schupp HT, Cuthbert BN, Bradley MM, et al., *Affective picture processing: the late positive potential is modulated by motivational relevance*. *Psychophysiology* 2000; **37**(2):257-61.
53. Dolcos F, Cabeza R, *Event-related potentials of emotional memory: encoding pleasant, unpleasant, and neutral pictures*. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2002; **2**(3):252-63.

54. Schupp HT, Junghofer M, Weike AI, Hamm AO, *Emotional facilitation of sensory processing in the visual cortex*. Psychol Sci 2003; **14**(1):7-13.
55. Cuthbert BN, Schupp HT, Bradley MM, Birbaumer N, Lang PJ, *Brain potentials in affective picture processing: covariation with autonomic arousal and affective report*. Biol Psychol 2000; **52**(2):95-111.
56. Polich J, *Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b*. Clin Neurophysiol 2007; **118**(10):2128-48.
57. Volpe U, Mucci A, Bucci P, et al., *The cortical generators of P3a and P3b: a LORETA study*. Brain Res Bull 2007; **73**(4-6):220-30.
58. Foti D, Hajcak G, Dien J, *Differentiating neural responses to emotional pictures: evidence from temporal-spatial PCA*. Psychophysiology 2009; **46**(3):521-30.
59. Werheid K, Schacht A, Sommer W, *Facial attractiveness modulates early and late event-related brain potentials*. Biol Psychol 2007; **76**(1-2):100-8.
60. Weinberg A, Hajcak G, *Beyond good and evil: the time-course of neural activity elicited by specific picture content*. Emotion 2010; **10**(6):767-82.
61. Ferrari V, Codispoti M, Cardinale R, Bradley MM, *Directed and motivated attention during processing of natural scenes*. J Cogn Neurosci 2008; **20**(10):1753-61.
62. Moser JS, Hajcak G, Bukay E, Simons RF, *Intentional modulation of emotional responding to unpleasant pictures: an ERP study*. Psychophysiology 2006; **43**(3):292-6.
63. Dunning JP, Hajcak G, *See no evil: directing visual attention within unpleasant images modulates the electrocortical response*. Psychophysiology 2009; **46**(1):28-33.
64. Hajcak G, Dunning JP, Foti D, *Motivated and controlled attention to emotion: time-course of the late positive potential*. Clin Neurophysiol 2009; **120**(3):505-10.
65. Foti D, Hajcak G, *Deconstructing reappraisal: Descriptions preceding arousing pictures modulate the subsequent neural response*. J Cogn Neurosci 2008; **20**(6):977-988.
66. Ochsner KN, Gross JJ, *The cognitive control of emotion*. Trends Cogn Sci 2005; **9**(5):242-9.
67. Moratti S, Saugar C, Strange BA, *Prefrontal-occipitoparietal coupling underlies late latency human neuronal responses to emotion*. J Neurosci 2011; **31**(47):17278-86.

68. Herzmann G, Schweinberger SR, Sommer W, Jentsch I, *What's special about personally familiar faces? A multimodal approach*. Psychophysiology 2004; **41**(5):688-701.
69. Bobes MA, Quinonez I, Perez J, Leon I, Valdes-Sosa M, *Brain potentials reflect access to visual and emotional memories for faces*. Biol Psychol 2007; **75**(2):146-53.
70. Voss JL, Paller KA, *Fluent conceptual processing and explicit memory for faces are electrophysiologically distinct*. J Neurosci 2006; **26**(3):926-33.
71. Guerra P, Campagnoli RR, Vico C, et al., *Filial versus romantic love: contributions from peripheral and central electrophysiology*. Biol Psychol 2011; **88**(2-3):196-203.
72. Langeslag SJ, Jansma BM, Franken IH, Van Strien JW, *Event-related potential responses to love-related facial stimuli*. Biol Psychol 2007; **76**(1-2):109-15.
73. Vico C, Guerra P, Robles H, Vila J, Anllo-Vento L, *Affective processing of loved faces: contributions from peripheral and central electrophysiology*. Neuropsychologia 2010; **48**(10):2894-902.
74. Grasso DJ, Simons RF, *Perceived parental support predicts enhanced late positive event-related brain potentials to parent faces*. Biol Psychol 2011; **86**(1):26-30.
75. Guerra P, Vico C, Campagnoli R, et al., *Affective processing of loved familiar faces: integrating central and peripheral electrophysiological measures*. Int J Psychophysiol 2012; **85**(1):79-87.
76. Grasso DJ, Moser JS, Dozier M, Simons R, *ERP correlates of attention allocation in mothers processing faces of their children*. Biol Psychol 2009; **81**(2):95-102.
77. Proverbio AM, Brignone V, Matarazzo S, Del Zotto M, Zani A, *Gender and parental status affect the visual cortical response to infant facial expression*. Neuropsychologia 2006; **44**(14):2987-99.
78. Langeslag SJ, Franken IH, Van Strien JW, *Dissociating love-related attention from task-related attention: an event-related potential oddball study*. Neurosci Lett 2008; **431**(3):236-40.
79. Wessing I, Furniss T, Zwitterlood P, Dobel C, Junghofer M, *Early emotion discrimination in 8- to 10-year-old children: magnetoencephalographic correlates*. Biol Psychol 2011; **88**(2-3):161-9.

80. Sabatinelli D, Lang PJ, Keil A, Bradley MM, *Emotional perception: correlation of functional MRI and event-related potentials*. Cereb Cortex 2007; **17**(5):1085-91.
81. Bartels A, Zeki S, *The neural basis of romantic love*. Neuroreport 2000; **11**(17):3829-34.
82. Bartels A, Zeki S, *The neural correlates of maternal and romantic love*. Neuroimage 2004; **21**(3):1155-66.
83. Zeki S, Romaya JP, *The brain reaction to viewing faces of opposite- and same-sex romantic partners*. PLoS One 2010; **5**(12):e15802.
84. Acevedo BP, Aron A, Fisher HE, Brown LL, *Neural correlates of long-term intense romantic love*. Soc Cogn Affect Neurosci 2012; **7**(2):145-59.
85. Aron A, Fisher H, Mashek DJ, et al., *Reward, motivation, and emotion systems associated with early-stage intense romantic love*. J Neurophysiol 2005; **94**(1):327-37.
86. Xu X, Aron A, Brown L, et al., *Reward and motivation systems: a brain mapping study of early-stage intense romantic love in Chinese participants*. Hum Brain Mapp 2011; **32**(2):249-57.
87. Holmes EA, Mathews A, *Mental imagery in emotion and emotional disorders*. Clin Psychol Rev 2010; **30**(3):349-62.
88. Ganis G, Thompson WL, Kosslyn SM, *Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception: an fMRI study*. Brain Res Cogn Brain Res 2004; **20**(2):226-41.
89. Ishai A, Ungerleider LG, Haxby JV, *Distributed neural systems for the generation of visual images*. Neuron 2000; **28**(3):979-90.
90. Mechelli A, Price CJ, Friston KJ, Ishai A, *Where bottom-up meets top-down: neuronal interactions during perception and imagery*. Cereb Cortex 2004; **14**(11):1256-65.
91. Costa VD, Lang PJ, Sabatinelli D, Versace F, Bradley MM, *Emotional imagery: assessing pleasure and arousal in the brain's reward circuitry*. Hum Brain Mapp 2010; **31**(9):1446-57.
92. Bartolomeo P, *The neural correlates of visual mental imagery: an ongoing debate*. Cortex 2008; **44**(2):107-8.
93. Johnson MR, Mitchell KJ, Raye CL, D'Esposito M, Johnson MK, *A brief thought can modulate activity in extrastriate visual areas: Top-down effects of refreshing just-seen visual stimuli*. Neuroimage 2007; **37**(1):290-9.

-
94. Page JW, Duhamel P, Crognale MA, *ERP evidence of visualization at early stages of visual processing*. Brain Cogn 2011; **75**(2):141-6.
 95. Ganis G, Schendan HE, *Visual mental imagery and perception produce opposite adaptation effects on early brain potentials*. Neuroimage 2008; **42**(4):1714-27.
 96. Diekhof EK, Kipshagen HE, Falkai P, et al., *The power of imagination--how anticipatory mental imagery alters perceptual processing of fearful facial expressions*. Neuroimage 2011; **54**(2):1703-14.
 97. Bar M, Kassam KS, Ghuman AS, et al., *Top-down facilitation of visual recognition*. Proc Natl Acad Sci U S A 2006; **103**(2):449-54.
 98. Summerfield C, Egnér T, Greene M, et al., *Predictive codes for forthcoming perception in the frontal cortex*. Science 2006; **314**(5803):1311-4.
 99. Fenske MJ, Aminoff E, Gronau N, Bar M, *Top-down facilitation of visual object recognition: object-based and context-based contributions*. Prog Brain Res 2006; **155**:3-21.
 100. Barrett LF, Bar M, *See it with feeling: affective predictions during object perception*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2009; **364**(1521):1325-34.
 101. Roth G, Dicke U, *Funktionelle Neuroanatomie des Limbischen Systems*, in Förstl H, Hautzinger M, Roth G, eds. *Neurobiologie psychischer Störungen*. 1st ed. Heidelberg, Germany: Springer, 2006:3-74.
 102. LeDoux JE, *Emotion circuits in the brain*. Annu Rev Neurosci 2000; **23**:155-84.
 103. Small DM, Zatorre RJ, Dagher A, Evans AC, Jones-Gotman M, *Changes in brain activity related to eating chocolate: from pleasure to aversion*. Brain 2001; **124**(Pt 9):1720-33.
 104. Sell LA, Morris J, Bearn J, et al., *Activation of reward circuitry in human opiate addicts*. Eur J Neurosci 1999; **11**(3):1042-8.
 105. Schultz W, *Multiple reward signals in the brain*. Nat Rev Neurosci 2000; **1**(3):199-207.
 106. Wise RA, *Dopamine, learning and motivation*. Nat Rev Neurosci 2004; **5**(6):483-94.
 107. Cloutier J, Heatherton TF, Whalen PJ, Kelley WM, *Are attractive people rewarding? Sex differences in the neural substrates of facial attractiveness*. J Cogn Neurosci 2008; **20**(6):941-51.

108. Senior C, *Beauty in the brain of the beholder*. Neuron 2003; **38**(4):525-8.
109. Winston JS, O'Doherty J, Kilner JM, Perrett DI, Dolan RJ, *Brain systems for assessing facial attractiveness*. Neuropsychologia 2007; **45**(1):195-206.
110. Rilling J, Gutman D, Zeh T, et al., *A neural basis for social cooperation*. Neuron 2002; **35**(2):395-405.
111. Rolls ET, *The orbitofrontal cortex and reward*. Cereb Cortex 2000; **10**(3):284-94.
112. Bechara A, Damasio H, Damasio AR, *Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex*. Cereb Cortex 2000; **10**(3):295-307.
113. Kringelbach ML, *The human orbitofrontal cortex: linking reward to hedonic experience*. Nat Rev Neurosci 2005; **6**(9):691-702.
114. Karama S, Lecours AR, Leroux JM, et al., *Areas of brain activation in males and females during viewing of erotic film excerpts*. Hum Brain Mapp 2002; **16**(1):1-13.
115. Holstege G, Georgiadis JR, Paans AM, et al., *Brain activation during human male ejaculation*. J Neurosci 2003; **23**(27):9185-93.
116. Nitschke JB, Nelson EE, Rusch BD, et al., *Orbitofrontal cortex tracks positive mood in mothers viewing pictures of their newborn infants*. Neuroimage 2004; **21**(2):583-92.
117. Burgdorf J, Panksepp J, *The neurobiology of positive emotions*. Neurosci Biobehav Rev 2006; **30**(2):173-87.
118. Augustine JR, *Circuitry and functional aspects of the insular lobe in primates including humans*. Brain Res Brain Res Rev 1996; **22**(3):229-44.
119. Calder AJ, Lawrence AD, Young AW, *Neuropsychology of fear and loathing*. Nat Rev Neurosci 2001; **2**(5):352-63.
120. Francis S, Rolls ET, Bowtell R, et al., *The representation of pleasant touch in the brain and its relationship with taste and olfactory areas*. Neuroreport 1999; **10**(3):453-9.
121. Olausson H, Lamarre Y, Backlund H, et al., *Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex*. Nat Neurosci 2002; **5**(9):900-4.
122. Damasio AR, Grabowski TJ, Bechara A, et al., *Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions*. Nat Neurosci 2000; **3**(10):1049-56.

123. Damasio AR, *The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 1996; **351**(1346):1413-20.
124. Critchley HD, Mathias CJ, Dolan RJ, *Neuroanatomical basis for first- and second-order representations of bodily states*. Nat Neurosci 2001; **4**(2):207-12.
125. Bush G, Luu P, Posner MI, *Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex*. Trends Cogn Sci 2000; **4**(6):215-222.
126. Davis M, Whalen PJ, *The amygdala: vigilance and emotion*. Mol Psychiatry 2001; **6**(1):13-34.
127. Olsson A, Phelps EA, *Social learning of fear*. Nat Neurosci 2007; **10**(9):1095-102.
128. Amaral DG, Capitanio JP, Jourdain M, et al., *The amygdala: is it an essential component of the neural network for social cognition?* Neuropsychologia 2003; **41**(2):235-40.
129. Zald DH, *The human amygdala and the emotional evaluation of sensory stimuli*. Brain Res Brain Res Rev 2003; **41**(1):88-123.
130. Costafreda SG, Brammer MJ, David AS, Fu CH, *Predictors of amygdala activation during the processing of emotional stimuli: a meta-analysis of 385 PET and fMRI studies*. Brain Res Rev 2008; **58**(1):57-70.
131. Etkin A, Wager TD, *Functional neuroimaging of anxiety: a meta-analysis of emotional processing in PTSD, social anxiety disorder, and specific phobia*. Am J Psychiatry 2007; **164**(10):1476-88.
132. Adolphs R, Tranel D, Damasio AR, *The human amygdala in social judgment*. Nature 1998; **393**(6684):470-4.
133. Greene J, Haidt J, *How (and where) does moral judgment work?* Trends Cogn Sci 2002; **6**(12):517-523.
134. Winston JS, Strange BA, O'Doherty J, Dolan RJ, *Automatic and intentional brain responses during evaluation of trustworthiness of faces*. Nat Neurosci 2002; **5**(3):277-83.
135. Völlm BA, Taylor AN, Richardson P, et al., *Neuronal correlates of theory of mind and empathy: a functional magnetic resonance imaging study in a nonverbal task*. Neuroimage 2006; **29**(1):90-8.
136. Rizzolatti G, Craighero L, *The mirror-neuron system*. Annu Rev Neurosci 2004; **27**:169-92.

137. Singer T, Frith C, *The painful side of empathy*. Nat Neurosci 2005; **8**(7):845-6.
138. Wicker B, Keysers C, Plailly J, et al., *Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust*. Neuron 2003; **40**(3):655-64.
139. Gallese V, *The manifold nature of interpersonal relations: the quest for a common mechanism*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 2003; **358**(1431):517-28.
140. Kosfeld M, Heinrichs M, Zak PJ, Fischbacher U, Fehr E, *Oxytocin increases trust in humans*. Nature 2005; **435**(7042):673-6.
141. Kirsch P, Esslinger C, Chen Q, et al., *Oxytocin modulates neural circuitry for social cognition and fear in humans*. J Neurosci 2005; **25**(49):11489-93.
142. Petrovic P, Kalisch R, Singer T, Dolan RJ, *Oxytocin attenuates affective evaluations of conditioned faces and amygdala activity*. J Neurosci 2008; **28**(26):6607-15.
143. Morell V, *A new look at monogamy*. Science 1998; **281**(5385):1982-3.
144. Carter CS, DeVries AC, Getz LL, *Physiological substrates of mammalian monogamy: the prairie vole model*. Neurosci Biobehav Rev 1995; **19**(2):303-14.
145. Young LJ, Wang Z, *The neurobiology of pair bonding*. Nat Neurosci 2004; **7**(10):1048-54.
146. Insel TR, Fernald RD, *How the brain processes social information: searching for the social brain*. Annu Rev Neurosci 2004; **27**:697-722.
147. Aragona BJ, Liu Y, Yu YJ, et al., *Nucleus accumbens dopamine differentially mediates the formation and maintenance of monogamous pair bonds*. Nat Neurosci 2006; **9**(1):133-9.
148. Huber D, Veinante P, Stoop R, *Vasopressin and oxytocin excite distinct neuronal populations in the central amygdala*. Science 2005; **308**(5719):245-8.
149. Keverne EB, Curley JP, *Vasopressin, oxytocin and social behaviour*. Curr Opin Neurobiol 2004; **14**(6):777-83.
150. Insel TR, Young LJ, *Neuropeptides and the evolution of social behavior*. Curr Opin Neurobiol 2000; **10**(6):784-9.
151. Carmichael MS, Warburton VL, Dixen J, Davidson JM, *Relationships among cardiovascular, muscular, and oxytocin responses during human sexual activity*. Arch Sex Behav 1994; **23**(1):59-79.

-
152. Gimpl G, Fahrenholz F, *The oxytocin receptor system: structure, function, and regulation*. *Physiol Rev* 2001; **81**(2):629-83.
153. Pfau JG, *Neurobiology of sexual behavior*. *Curr Opin Neurobiol* 1999; **9**(6):751-8.
154. Loup F, Tribollet E, Dubois-Dauphin M, Dreifuss JJ, *Localization of high-affinity binding sites for oxytocin and vasopressin in the human brain. An autoradiographic study*. *Brain Res* 1991; **555**(2):220-32.
155. Fries AB, Ziegler TE, Kurian JR, Jacoris S, Pollak SD, *Early experience in humans is associated with changes in neuropeptides critical for regulating social behavior*. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2005; **102**(47):17237-40.
156. Cushing BS, Kramer KM, *Mechanisms underlying epigenetic effects of early social experience: the role of neuropeptides and steroids*. *Neurosci Biobehav Rev* 2005; **29**(7):1089-105.
157. Vrba J, Robinson SE, *Signal processing in magnetoencephalography*. *Methods* 2001; **25**(2):249-71.
158. Hämäläinen M, Hari R, Ilmoniemi RJ, Knuutila J, Lounasmaa OV, *Magnetoencephalography - theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working brain*. *Rev Mod Phys* 1993; **65**(2):414-97.
159. Roberts TP, Rowley HA, *Magnetoencephalography and Magnetic Source Imaging*, in Latchaw R, Kucharczyk J, Moseley M, eds. *Imaging of the Nervous System. Diagnostic and Therapeutic Applications*. 1st ed. St. Louis, Philadelphia, USA: Elsevier - Mosby, 2004:125-40.
160. Sander T, Wübbeler G, Lueschow A, Curio G, Trahms L, *Cardiac artifact subspace identification and elimination in cognitive MEG data using time-delayed decorrelation*. *IEEE Trans Biomed Eng* 2002; **49**:345-54.
161. Ahlers CJ, Neutze J, Mundt I, et al., *Erhebungsinstrumente in der klinischen Sexualforschung und der sexualmedizinischen Praxis - Teil II*. *Sexuologie* 2008; **15**:82-103.
162. Ahlers CJ, Schäfer GA, Beier KM, *Erhebungsinstrumente in der klinischen Sexualforschung und der sexualmedizinischen Praxis - Ein Überblick über die Fragebogenentwicklung in Sexualwissenschaft und Sexualmedizin*. *Sexuologie* 2004; **11**:74-97.

163. Ahlers CJ, Hupp E, Mundt I, Neutze J, Schäfer GA, *Fragebogen zum sexuellen Erleben und Verhalten (FSEV)*. 2004.
164. Neutze J, Schäfer GA, Ahlers CJ, *Fragebogen zum Ausmaß syndyastischer Erfüllung in Beziehungen (FA-SEB)*. 2006.
165. Hatfield E, Sprecher S, *Measuring passionate love in intimate relationships*. J Adolesc 1986; **9**(4):383-410.
166. Ortigue S, Bianchi-Demicheli F, Hamilton AF, Grafton ST, *The neural basis of love as a subliminal prime: an event-related functional magnetic resonance imaging study*. J Cogn Neurosci 2007; **19**(7):1218-30.
167. Baumeister RF, *Gender differences in erotic plasticity: the female sex drive as socially flexible and responsive*. Psychol Bull 2000; **126**(3):347-74; discussion 385-9.
168. Peyk P, Schupp HT, Elbert T, Junghofer M, *Emotion processing in the visual brain: a MEG analysis*. Brain Topogr 2008; **20**(4):205-15.
169. McCarthy G, Puce A, Belger A, Allison T, *Electrophysiological studies of human face perception. II: Response properties of face-specific potentials generated in occipitotemporal cortex*. Cereb Cortex 1999; **9**(5):431-44.
170. Ashley V, Vuilleumier P, Swick D, *Time course and specificity of event-related potentials to emotional expressions*. Neuroreport 2004; **15**(1):211-6.
171. Li NP, Bailey JM, Kenrick DT, Linsenmeier JA, *The necessities and luxuries of mate preferences: testing the tradeoffs*. J Pers Soc Psychol 2002; **82**(6):947-55.
172. Oliver-Rodriguez JC, Guan Z, Johnston VS, *Gender differences in late positive components evoked by human faces*. Psychophysiology 1999; **36**(2):176-85.
173. Schacht A, Werheid K, Sommer W, *The appraisal of facial beauty is rapid but not mandatory*. Cogn Affect Behav Neurosci 2008; **8**(2):132-42.
174. Rudrauf D, David O, Lachaux JP, et al., *Rapid interactions between the ventral visual stream and emotion-related structures rely on a two-pathway architecture*. J Neurosci 2008; **28**(11):2793-803.
175. Esslen M, Pascual-Marqui RD, Hell D, Kochi K, Lehmann D, *Brain areas and time course of emotional processing*. Neuroimage 2004; **21**(4):1189-203.

176. Rudrauf D, Lachaux JP, Damasio A, et al., *Enter feelings: somatosensory responses following early stages of visual induction of emotion*. Int J Psychophysiol 2009; **72**(1):13-23.
177. van Lankveld JJ, Smulders FT, *The effect of visual sexual content on the event-related potential*. Biol Psychol 2008; **79**(2):200-8.
178. Deffke I, Sander T, Heidenreich J, et al., *MEG/EEG sources of the 170-ms response to faces are co-localized in the fusiform gyrus*. Neuroimage 2007; **35**(4):1495-501.
179. Adolphs R, Damasio H, Tranel D, Cooper G, Damasio AR, *A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping*. J Neurosci 2000; **20**(7):2683-90.

8 Erklärung

Ich, Hannes Ole Tiedt, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Neurobiologie der Paarbindung: Magnetenzephalographische Messung neurophysiologischer Äquivalente affektiver Wahrnehmungen im menschlichen Paarbindungserleben und -verhalten“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

Anteilserklärung an Publikationen

Hannes Ole Tiedt hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: Tiedt HO, Beier KM, Lueschow A, Pauls A, Weber JE, *Left-lateralized brain activity during processing personally familiar and loved faces: A MEG study*. Soc Cogn Affect Neurosci (eingereicht).

Publikation 2: Tiedt HO, Weber JE, Pauls A, Beier KM, Lueschow A, *Sex-Differences of Face Coding: Evidence from Larger Right Hemispheric M170 in Men and Dipole Source Modelling*. PLoS ONE 2013; **8**(7):e69107.

Beitrag im Einzelnen (Beide Publikationen): Teilnahme an der Entwicklung des experimentellen Paradigmas, Durchführung der Experimente, Auswertung, Schreiben des Manuskripts.

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

9 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

10 Publikationsliste

1. Tiedt HO, Weber JE, Pauls A, Beier KM, Lueschow A, *Sex-Differences of Face Coding: Evidence from Larger Right Hemispheric M170 in Men and Dipole Source Modelling*. PLoS ONE 2013; **8**(7):e69107.
2. Tiedt HO, Beier KM, Lueschow A, Pauls A, Weber JE, *Left-lateralized brain activity during processing personally familiar and loved faces: A MEG study*. Soc Cogn Affect Neurosci (eingereicht).
3. Tiedt HO, Lueschow A, Winter P, Muller U, *Previously not recognized deletion in presenilin-1 (p.Leu174del.) in a patient with early-onset familial Alzheimer's disease*. Neurosci Lett 2013; **544**:115-118.
4. Tiedt HO, Wenzel R, *Persistent hiccups as sole manifestation of right cortical infarction without apparent brainstem lesion*. J Neurol 2013; **260**(7):1913-4.

11 Danksagung

Für die Betreuung meiner Dissertation möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Dr. Beier und Dr. Pauls bedanken. Von großer Bedeutung war weiterhin die Unterstützung aller Mitarbeiter aus dem Institut für Sexualwissenschaft und Sexualmedizin, dabei sind Dipl. Psych. Janina Neutze und Dipl. Psych. Ingrid Mundt hervor zu heben, die mich bei Auswahl und Auswertung der testpsychologischen Verfahren sehr unterstützt haben. Frau Dimitrowa war mir in allen organisatorischen Dingen eine große Hilfe. Einen entscheidenden Anteil am Entstehen der Arbeit hat schließlich Dr. Joachim Weber, mit dem ich die MEG-Messungen durchführen und Auswertestrategien entwickeln konnte. Aus der Klinik für Neurologie der Charité, Campus Benjamin Franklin möchte ich mich bei Dr. Andreas Lüschof für seine wichtigen und sehr bereichernden inhaltlichen Anregungen bei Fertigstellung dieser Arbeit bedanken.

Für die persönliche Unterstützung bin ich Nicola Klein, meinen Eltern Wolfgang und Anne Tiedt sowie allen Freunden, die teilweise auch als Versuchspersonen in der Vorbereitungsphase des Experiments zur Verfügung standen, sehr dankbar.