

AUS DEM LEHRSTUHL FÜR NEUROLOGIE
PROF. DR. RALF LINKER
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

Zentral-neurophysiologische und vegetative Aspekte der emotionalen Beeinflussung
von präattentiver Wahrnehmung

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Sabine Winter

2019

AUS DEM LEHRSTUHL FÜR NEUROLOGIE
PROF. DR. RALF LINKER
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

Zentral-neurophysiologische und vegetative Aspekte der emotionalen Beeinflussung
von präattentiver Wahrnehmung

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Sabine Winter

2019

Dekan:	Prof. Dr. Dr. Torsten E. Reichert
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Ulrich Bogdahn
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Thomas Wetter
Tag der mündlichen Prüfung:	20.11.2019

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einleitung	7
1.1	Orientierung in einer akustischen Umwelt	7
1.2	Evozierte Potentiale im Elektroenzephalogramm	8
1.3	Die Mismatch Negativity	10
1.3.1	Testsystem	10
1.3.2	Grundlagen zur Entstehung der MMN	14
1.3.2.1	Gedächtnisspur und zeitliches Integrationsfenster	14
1.3.2.2	Beteiligte neuronale Netzwerke und Korrelate in der Bildgebung	16
1.3.2.3	Beteiligte Transmittersysteme	17
1.3.3	Aufmerksamkeit und Bewusstseinszustand	18
1.3.4	Neurobiologische Hypothesen zur Genese der Mismatch Negativity	21
1.3.4.1	Die „model-adjustment“-Hypothese	21
1.3.4.2	Die Adaptationshypothese	22
1.3.4.3	Prädiktives Kodieren	23
1.3.5	Einflussfaktoren auf die MMN	26
1.3.5.1	Emotionale Zustände des Probanden	26
1.3.5.2	Emotionale akustische Stimuli	27
1.3.5.3	Visuelle Beeinflussung	28
1.4	Das International Affective Picture System	28
1.4.1	Emotionen - Grundgedanken	28
1.4.2	Emotionsmodell nach P.J. Lang	29
1.4.3	Aufbau des International Affective Picture System	31
1.4.4	Emotionen und physiologische Reaktionen	32
1.4.4.1	Emotionen und autonomes Nervensystem	32
1.4.4.2	Puls Transit Zeit	35
1.4.4.3	Herzrate	35
1.4.5	Emotion und Ereignis-korrelierte Potentiale	36
1.4.6	Emotionswahrnehmung und neuronale Korrelate in der Bildgebung	37
1.5	Herleitung der Untersuchungshypothesen	39

2	Methodik	41
2.1	Probanden	41
2.2	Untersuchungsbedingungen und Ablauf der Untersuchung	41
2.3	MMN-Untersuchung	43
2.3.1	EEG-Registrierung	43
2.3.2	Akustische Stimulation	44
2.3.3	Analyse der EEG-Daten und Bestimmung der MMN	44
2.4	Vegetative Parameter	45
2.4.1	Herzrate	45
2.4.2	Pulstransitzeit	45
2.5	Visuelle Stimulation	46
2.6	Statistische Auswertung	46
3	Ergebnisse	48
3.1	Datenbeschreibung	48
3.1.1	Mismatch Negativity	49
3.1.2	Herzrate	50
3.1.3	Puls Transit Zeit	50
3.2	Statistischer Vergleich der verschiedenen Untersuchungsbedingungen	51
3.2.1	Mismatch Negativity	53
3.2.2	Herzrate	53
3.2.3	Puls Transit Zeit	53
3.3	Wertekorrelationen	54
3.3.1	Wertekorrelationen von Mismatch Negativity und Herzrate	54
3.3.1.1	Untersuchungsbedingung „neutral“	54
3.3.1.2	Untersuchungsbedingung „angenehm“	55
3.3.1.3	Untersuchungsbedingung „unangenehm“	56
3.3.2	Wertekorrelationen von Mismatch Negativity und Puls Transit Zeit	57
3.3.2.1	Untersuchungsbedingung „neutral“	57
3.3.2.2	Untersuchungsbedingung „angenehm“	58
3.3.2.3	Untersuchungsbedingung „unangenehm“	59

4	Diskussion	61
4.1	Mismatch Negativity	61
4.2	Sinneskanäle zur Vermittlung der Emotion	63
4.2.1	Emotion eingebettet im akustischen Stimulus	63
4.2.2	Emotion herbeigeführt außerhalb der akustischen Modalität	64
4.3	Aufmerksamkeitsfokus	66
4.4	IAPS und vegetative Parameter	67
4.4.1	Herzrate	67
4.4.2	Puls Transit Zeit	67
4.5	Exkurs - die Load Theory nach N. Lavie	69
4.6	Ausblick	72
5	Zusammenfassung	75
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	88
	Tabellenverzeichnis	89
	Danksagung	

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

ANS	autonomes Nervensystem
CGM	Corpus geniculatum mediale
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EKP	Ereignis-korreliertes Potential
EOG	Elektrookulogramm
EP	Evoziertes Potential
ERP	Event-related Potential
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
HR	Herzrate
IAPS	International Affective Picture System
IC	Colliculi inferiores
IFG	Inferiorer frontaler Gyrus
ISI	Interstimulusintervall
LPP	Late Positive Potential
MD	Median
MEG	Magnetoencephalogramm
MMN	Mismatch Negativity
MMNm	im MEG gemessene MMN
MW	Mittelwert
NMDA	N-Methyl-D-Aspartat
PAG	Periaquäduktale graue Substanz
PET	Positionsemissionstomographie
PTT	pulse transit time = Puls Transit Zeit
SD	Standardabweichung
STG	Superiorer temporaler Gyrus

1 Einleitung

1.1 Orientierung in einer akustischen Umwelt

Tagtäglich sind wir einer Fülle verschiedenster Reize aus unserer Umwelt ausgesetzt. Um in dieser Vielfältigkeit eine Orientierung zu behalten, zu differenzieren und um uns anzupassen, benötigen wir Systeme, die uns diese Aufgabe auch ohne unser direktes bzw. bewusstes Zutun erleichtern.

Grundsätzlich ist es für alle Lebewesen, so auch uns Menschen, von u.a. vitaler Bedeutung, uns ein Bild von unserer Umwelt zu machen, um dann unsere Handlungen und Ziele daran anzupassen. So kann beispielsweise eine Abweichung von etwas Bekannten eine Veränderung in der Umwelt bedeuten und eine Konsequenz erfordern. Zudem gilt es, in dieser Fülle an Reizen, denen wir tagtäglich ausgesetzt sind, eine Art „Filter“ einzubauen, so dass wir ohne Gefahr der Reizüberflutung dennoch diejenigen Inputs herausfiltern, die für unsere Reaktionen und Taten eine Bedeutung haben (könnten). So kann sicher jede Mutter bestätigen, dass sie in einer Horde spielender Kinder ihres sofort erkennen und heraushören wird, wenn es beginnt zu rufen. Auch im Flugzeug können wir das Turbinengeräusch während des Fluges regelrecht „ausblenden“, wir nehmen es erst dann wahr, wenn der Pilot zum Beispiel bei Beginn des Landeanfluges die Geschwindigkeit drosselt. In eine spannende Lektüre vertieft kann es auch passieren, dass wir beispielsweise das Telefon nicht klingeln hören oder die Ansprache eines anderen Menschen erst dann wahrnehmen, wenn diese eine bestimmte „Heftigkeit“ erreicht hat.

Hinsichtlich unserer akustischen Umgebung besteht die Notwendigkeit, sich in der jeweiligen Lautkulisse beständig zu orientieren, Veränderungen wahrzunehmen und ggf. darauf zu reagieren. Im Gegensatz zur visuellen Sinnesmodalität kann bei akustischen Reizen eben nicht „noch einmal hingeschaut“, also hingehört, werden, um den Eindruck zu verifizieren, es ist also ein sehr feines und in höchstem Maße adaptives System erforderlich, um alle Eindrücke zeitnah zu meistern (I. Winkler & Schroger, 2015).

Sowohl die akustische Umgebung zu analysieren als auch Veränderungen zu entdecken erfordert das Entstehen und Vorhandensein von Repräsentationen der

gerade noch präsent gewesenen akustischen Stimuli. Die nahe Vergangenheit (resp. das Kurzzeitgedächtnis) als auch das Langzeitgedächtnis spielen in der Genese solcher Repräsentationen jeweils auf ihre Art eine wichtige Rolle. Neben und mit dem durch den „Input“ generierten akustischen Bild wird auch ein Bild der erwarteten akustischen Umwelt geschaffen. Akustische Reize werden also nach Möglichkeit in eine Regelmäßigkeit eingebettet, welche als Repräsentant für die weitere Erwartung des nächsten eintreffenden Reizes dienen kann. Somit ist es eine notwendige Voraussetzung, Regeln bzw. Muster zu erkennen und dann darin Abweichungen zu erkennen (I. Winkler & Schroger, 2015). In den letzten Jahren wurden auf Grundlage vieler Forschungsarbeiten Theorien entwickelt, wie unser Gehirn Vorhersagen über die Zukunft entstehen lässt. Ein Resultat dieser Arbeiten ist das Modell des „Prädiktiven Kodierens“ von Friston (u.a. 2010a; 2005), welches in Kapitel 1.2.3.3 noch ausführlichere Erwähnung finden wird. In diesem Modell werden verschiedene hierarchisch angeordnete und miteinander kommunizierende Ebenen im Gehirn angenommen, die jeweils den aktuellen Input mit der „Vorhersage“ vergleichen und gegebenenfalls Anpassungsprozesse vornimmt, sollte die Erwartung nicht eingetroffen sein.

Diese Anpassungsprozesse - oder Fehlermeldungen - bezogen auf die akustische Modalität sind diejenigen Signale, die u.a. der Genese der Mismatch Negativity, MMN, (Näätänen, Gaillard, & Mäntysalo, 1978) zugeschrieben werden (u.a. Garrido, Kilner, Stephan, & Friston, 2009; Kujala, Tervaniemi, & Schroger, 2007), und welche Inhalt der folgenden Arbeit sein soll.

1.2 Evozierte Potentiale im Elektroenzephalogramm

Evozierte Potentiale (EP) sind durch Reize hervorgerufene Veränderungen, welche im Elektroenzephalogramm (EEG) zusätzlich zur Spontanaktivität auftreten (u.a. Kofler, 2009). Auslösende Reize können Sinneswahrnehmungen oder auch kognitive Prozesse i.S. einer zerebralen Reizverarbeitung sein, die in direkter Verbindung zu einem Ereignis stehen. Nachdem diese Potentiale sowohl eine niedrige Amplitude als auch unterschiedliche Latenzen aufweisen, sind sie so im Roh-EEG kaum

abgrenzbar. Daher werden zur Darstellung der EPs wiederholte reizkorrelierte EEG-Messungen gemittelt, um die EPs unabhängig von der spontanen EEG-Aktivität darstellen zu können, das sogenannte Average-Verfahren (Köhling, Bingmann, & Speckmann, 2013).

Innerhalb der Gruppe der EPs lassen sich exogene von endogenen Evozierten Potentialen anhand ihrer Latenz unterscheiden (Köhling et al., 2013). Unter exogenen Potentialen versteht man diejenigen, die bis 100 ms nach Reizsetzung auftreten, sie werden der physikalischen Reizverarbeitung und entsprechend der somatosensiblen, auditiven oder visuellen Modalität zugeordnet. Ihnen folgen die sog. endogenen Potentiale, auch Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) oder auch Event-related Potentials (ERP) genannt, die kognitiven Prozessen zugeordnet werden. Die wohl bekannteste und seit ihrer Erstbeschreibung von Sutton im Jahre 1965 am meisten untersuchte dieser späteren Komponenten ist die P300. Es handelt sich hierbei um eine positive Polarität 300 ms nach akustischer Reizsetzung, welche dann generiert wird, wenn in einer Reihe von akustischen Stimuli auffällige Zielreize auftreten, deren Detektion an eine bewusste kognitive Leistung, wie beispielsweise das Zählen der Zielreize, geknüpft ist (Duncan et al., 2009; Friedman, Cycowicz, & Gaeta, 2001).

In der Gruppe der ERPs findet sich auch die Mismatch Negativity (MMN: (Naatanen et al., 1978)), eine Veränderungs-spezifische Komponente des akustisch evozierten Potentials (u.a. Naatanen, Paavilainen, Rinne, & Alho, 2007). Diese Komponente lässt sich dann im EEG ableiten, wenn in einer Serie akustischer Reizdarbietungen (die sog. „Standards“) unregelmäßig ein Stimulus dargeboten wird, der in mindestens einem Attribut von den Standardreizen abweicht (der sog. „Deviant“). Der wesentliche Unterschied zur P300 ist hierbei, dass die MMN unabhängig vom Aufmerksamkeitsfokus auftritt. Typischerweise wird während der Präsentation der die MMN auslösenden akustischen Stimuli die Aufmerksamkeit des Probanden auf einen anderen Sinneskanal gelenkt, wie bspw. ein Stummfilm, den es anzusehen gilt, was die Bedeutung der vorbewussten Qualität der MMN hervorhebt. Eine genauere

Erläuterung der Generierung der MMN in verschiedenen Versuchsaufbauten sowie Theorien zur Entstehung ihrer soll das folgende Kapitel liefern.

1.3 Die Mismatch Negativity

1.3.1 Testsystem

Die MMN in akustischen ERPs ist seit der ersten Beschreibung Gegenstand breiter und vielfältiger Forschung (Näätänen et al., 1978) und wurde in verschiedensten Versuchsaufbauten untersucht. Es finden sich auch Hinweise für ein visuelles oder somatosensibles MMN-Äquivalent (Akatsuka et al., 2005; Czigler, 2014; Czigler, Sulykos, File, Kojouharova, & Gaal, 2019; Kekoni et al., 1997; Pazo-Alvarez, Cadaveira, & Amenedo, 2003). Im Folgenden soll jedoch nur die MMN im auditiven Kontext betrachtet werden.

In der Literatur besteht weitgehend Konsens, dass es sich bei der MMN um ein automatisches Hirnstrom-Korrelat handelt, das dann in Erscheinung tritt, wenn eine Änderung in einer auditiven Reizdarbietung auftritt. Erstmals wurde es von Näätänen et al. (1978) im Zusammenhang mit akustischen Reizen beschrieben. Messbar ist die MMN mittels EEG, Magnetoencephalogramm (MEG, dann: MMNm), auch finden sich Entsprechungen in der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), wobei das Hintergrundgeräusch des MRT-Gerätes keinen Einfluss auf die MMN ausübt (Novitski et al., 2001), sowie in der Positronenemissionstomographie (PET) (Garrido et al., 2009; Näätänen et al., 2007).

Grundsätzlich erfordert der Versuchsaufbau das Vorhandensein eines akustischen „Standards“, eines Basisreizes, sowie einen davon abweichenden Reiz, der als „Deviant“ bezeichnet wird. Die MMN als Differenzpotential wird dann im EEG ermittelt und folglich sichtbar, indem die Standard-ERP-Welle von der des Deviants abgezogen wird (s. Abb. 1). Zur Berechnung kann entweder der negative Peak oder die Fläche unter der Kurve der MMN heran gezogen werden.

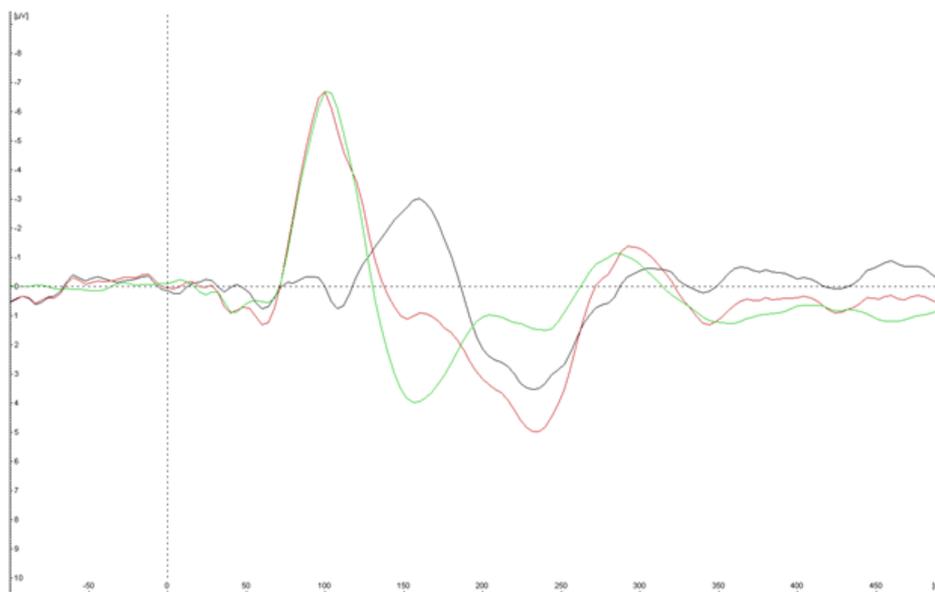


Abbildung 1:

grün: Standardreiz; rot: devianter Reiz; schwarz: Differenzkurve (Deviant minus Standard) = Mismatch Negativity (MMN)

Im Verlauf der Erforschung dieses Phänomens zeigten sich ausgehend von dem ursprünglichen Versuchsaufbau bei Näätänen (1978) mit Präsentation einzig zweier Töne, welche in einer physikalischen Größe, Tonhöhe oder Lautstärke, voneinander abwichen, zunehmend vielfältige und weitaus komplexere Möglichkeiten der Evozierung der MMN. Hierauf soll im folgenden Abschnitt genauer eingegangen werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass jede unerwartete Veränderung in einem sich wiederholenden Muster eines auditiven Reizes eine MMN auslöst. Aus den mannigfaltigen Variationsmöglichkeiten der Versuchsanordnungen sollen nun in repräsentativer Form ein paar genannt werden.

Eine Veränderung der Tonhöhe (Berti, Roeber, & Schroger, 2004; Jacobsen & Schroger, 2001), der Lautstärke (Kisley, Noecker, & Guinther, 2004; Novitski, Huotilainen, Tervaniemi, Naatanen, & Fellman, 2007), der Klangfarbe (Goydke, Altenmuller, Moller, & Munte, 2004; Tervaniemi, Winkler, & Naatanen, 1997) ruft ebenso wie die Veränderung von zeitlichen Aspekten des Stimulus, so z.B. der Tondauer (Naatanen, Syssoeva, & Takegata, 2004), einer Millisekunden andauernden Lücke innerhalb des Tones (Uther, Jansen, Huotilainen, Ilmoniemi, &

Naatanen, 2003) oder auch das Auslassen eines Reizes (Yabe, Tervaniemi, Reinikainen, & Naatanen, 1997) eine MMN hervor. Eine Änderung des Tonortes wurde ebenso mit einer MMN beantwortet (Schroger & Wolff, 1996). Zudem konnten Winkler et al. (2003) zeigen, dass auch in drei simultan präsentierten, verschiedenen akustischen Reizquellen eine Abweichung von einem Muster erkannt und eine MMN ausgelöst werden kann. Probanden wurden in dieser Untersuchung Verkehrslärm, Filmgeräuschen und Schrittgeräuschen gleichzeitig ausgesetzt. Letztere dienten als Standard und wurden in zufälliger Form von einem andersartigen Schrittgeräusch, ein Tritt auf Glas, unterbrochen. Trotz dieser hohen zusätzlichen Geräuschbelastung konnte das abweichende Geräusch in der Schrittfolge erkannt werden und eine MMN trat hervor.

In weniger konkreten Versuchsanordnungen, in denen sich kein gleicher, sich wiederholender Standardstimulus findet sondern es das Wesen der Standards ist, einzig einer abstrakten Regel zu folgen, kann ebenso eine MMN abgeleitet werden, wenn die Deviants dadurch abweichen, dass diese Regel gebrochen wird. Der Grundgedanke hierzu ist, dass ein abweichender Reiz in Abgrenzung zu einer akustischen Regelmäßigkeit wahrgenommen und erkannt werden kann. Dies erfordert Erkennungsprozesse, welche eingehende Reize nach bestimmten Kennzeichen verbinden sowie sortieren, um dann hieraus ein Muster zu entwickeln. Diese Fähigkeit wird als Zeichen des Vermögens der auditiven Mustererkennung und Reizdiskriminierung gewertet (I. Winkler & Schroger, 2015). Dies zeigt u.a. die von Paavilainen et al. (2003) durchgeführte Studie, bei der den Probanden verschiedene Tonpaare präsentiert wurden. Dabei waren Tonhöhe und Lautstärke zu keinem Zeitpunkt konstant und es gab weder eine sich wiederholende physikalische Konstante noch eine physikalische Verbindung der Standards untereinander. Standards unterschieden sich von den Deviants einzig dadurch, dass sich die Richtung der Tonhöhe und -lautstärke innerhalb dieser Paare voneinander unterschied. Standards zeichneten sich also dadurch aus, dass die Richtung der Änderung für den zweiten Ton „höher und lauter“ bzw. „tiefer und leiser“ eingehalten wurde. Diese Regel wurde von den abweichenden Tonpaaren umgedreht, folglich verletzt, und eine MMN wurde ausgelöst.

Interessanterweise kann die MMN auch die Unterscheidung sprachspezifischer Aspekte aufdecken (u.a. I. Winkler, Kujala, Alku, & Naatanen, 2003). Näätänen et al. (1997) konnten zeigen, dass ein Vokal, welcher als Deviant präsentiert wird, eine größere MMN-Amplitude hervorrief, wenn es sich hierbei um einen in der Muttersprache des Probanden existierenden Vokals handelt. Auf weiterführende, hoch interessante Untersuchungen betreffend die MMN in Sprache und Grammatik soll in diesem Zusammenhang angesichts der Fülle des Materials jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Auch von Seiten des Deviants aus sind zusätzlich noch weitere Voraussetzungen zu erfüllen, damit letztendlich eine MMN abgeleitet werden kann.

Wie stark der Kontextbezug der MMN ist, zeigt, dass nur eine kleine Änderung in einer einfachen Versuchsanordnung zum Verschwinden der MMN beiträgt. Ein Deviant mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von 20%, der sich in seiner physikalischen Eigenschaft, bspw. der Tonhöhe, von dem Standard unterscheidet und in zufälliger Form im Strom der Standards präsentiert wird, erzeugt eine MMN. Wird diese Zufälligkeit aber genommen und der oben angeführte Deviant regelmäßig, z.B. immer als fünfter Ton präsentiert, so lässt sich in bestimmten Versuchsanordnungen keine MMN ableiten, obwohl dies auch einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 20% entspricht. Hierbei spielt der zeitliche Abstand der Töne eine Rolle. So kann ab bei einem Tonbeginn-zu-Tonbeginn-Abstand von 100 bzw. auch 200 ms ein regelmäßig auftretender Deviant nicht erkannt werden, bei einem größer werdenden Abstand gelingt dies jedoch schon wieder und eine MMN wird evoziert. Es kann also angenommen werden, dass Töne mit einem geringeren zeitlichen Abstand zueinander als ein Tonmuster gebündelt, also als ein Standard gewertet werden, und nicht mehr als Einzeltöne im Vergleich miteinander stehen. (E. Sussman, Ritter, & Vaughan, 1998; E. S. Sussman & Gumenyuk, 2005). Diese Voraussetzung wird in Kap. 1.3.2.1 noch einmal aufgegriffen.

Neben diesem Aspekt spielt die Häufigkeit der vor dem Deviant präsentierten Standards eine wichtige Rolle. Die MMN nimmt in ihrer Amplitude mit einer zunehmenden Anzahl der Standards vor Deviantpräsentation zu (Haenschel, Vernon, Dwivedi, Gruzelić, & Baldeweg, 2005), was der Annahme der Autoren entspricht,

dass die Stärke der Gedächtnisspur (s. Kap. 1.3.2.1), durch mehrere Wiederholungen des Standards gebahnt wird und mit der Genese der MMN in Verbindung steht.

Auch die Frequenz der Präsentation des Standards und des Deviant beeinflusst die Ausprägung der MMN. Deren Amplitude ist am größten, wenn die Stimuli schnell aufeinander folgen, zum Beispiel alle 150 oder 600 ms, wohin sie nahezu nicht mehr erkenntlich ist, wenn nur alle 2400 ms ein akustischer Reiz gegeben wird (Sabri & Campbell, 2001).

Die zeitlichen Gegebenheiten der akustischen Reize spielen also in einem wesentlichen Ausmaß eine Rolle in der Generierung einer MMN, ein Grundgedanke, der sich im Konzept der Gedächtnisspur und des zeitlichen Integrationsfensters findet.

1.3.2 Grundlagen zur Entstehung der MMN

1.3.2.1 Gedächtnisspur und zeitliches Integrationsfenster

Voraussetzung für das Hervorrufen einer MMN ist nach allgemeinem Konsens das Vorhandensein eines Gedächtnisses bzw. eine Gedächtnisleistung im auditiven Kortex. Näätänen (2000) spricht von einem Lautgedächtnis, in das sich eine Gedächtnisspur des Standards zeichnet. So kann nach der ersten Reizpräsentation eines Stimulus noch keine MMN abgeleitet werden, der Standard muss zunächst einige Male wiederholt werden (Cowan, Winkler, Teder, & Naatanen, 1993). Dieses der MMN dienliche Gedächtnis besitzt die besondere Eigenschaft, die gleichbleibenden Eigenschaften von mindestens zwei akustischen Eindrücken zu extrahieren und dies als Repräsentanz zu verwenden, mit dem dann der Deviant verglichen und bei Abweichung die MMN generiert wird (Cowan et al., 1993; Ritter, Sussman, Molholm, & Foxe, 2002).

Ausgehend von dem Gedanken, dass dieses genannte Gedächtnis nur über ein bestimmtes Zeitfenster hinweg zur Verfügung steht, fanden verschiedene Untersuchungen und Annäherungen mittels Variation des Interstimulusintervall (ISI), also der Zeitdauer von Tonbeginn zu Tonbeginn, statt (Grau, Escera, Yago, & Polo,

1998; Sabri & Campbell, 2001; Sabri, Kareken, Dzemic, Lowe, & Melara, 2004; Sams, Hari, Rif, & Knuutila, 1993). Von diesem Zeitfenster wird angenommen, dass es das Lautgedächtnis repräsentiert, also das Zeitfenster, in dem sich gerade noch eine MMN auslösen lässt. Bei Sams, Hari et al. (1993) wird diese „Gedächtnisspur“ in jungen und gesunden Probanden mit ca. 10 Sekunden angegeben, ab dieser ISI-Länge konnte keine MMN mehr ausgelöst werden. Im Alter oder auch bei neurodegenerativen, das Gedächtnis beeinflussenden Erkrankungen wie beispielsweise bei der Alzheimer-Erkrankung nimmt die Dauer des ISI, in dem noch eine MMN ausgelöst werden kann, ab (Cooper, Todd, McGill, & Michie, 2006; Grau et al., 1998; Pekkonen, Jousmaki, Kononen, Reinikainen, & Partanen, 1994; Pekkonen et al., 1996).

Dennoch stellt das ISI vorerst nur eine Annäherung an das sensorische Gedächtnis dar und lässt nicht sicher direkte Rückschlüsse zu (Gaeta, Friedman, Ritter, & Cheng, 2001; Kujala et al., 2007). So könnte auch angenommen werden, dass das Gedächtnis zwar noch intakt ist, der eingehende Stimulus aber einfach nicht mit der Spur des Standards verglichen wird. So würden Vergleiche eher nach zugeschriebener Relevanz und nicht nach bestehendem Gedächtnis erfolgen. Zur weiteren Klärung sind in diesem Feld sicherlich noch weitere Studien ausstehend.

Neben der Rolle der „Gedächtnisspur“ i.S. eines zeitlich beschränkt bestehenden Gedächtnisrepräsentantes wird in Abgrenzung hierzu und im Zusammenhang mit der Genese der MMN auch das „Temporal Window of Integration“ (TWI) genannt (u.a. Naatanen et al., 2007). Dieses zeitliche Integrationsfenster wird mit einer Dauer von 150 - 200 ms angegeben. In dieser Zeit eingehende auditive Stimuli werden als ein Unit, also eine Gruppe, aufgenommen, zusammengefasst und integriert. So ließen sich in einer Versuchsanordnung, in der zwei Deviants in Folge präsentiert wurden, auch nur dann zwei MMN-Korrelate ableiten, wenn die Zeitdauer zwischen dem jeweiligen Beginn der Präsentation der Stimulusänderung 250 ms betrug. War diese nur bei 150 ms, so wurden die beiden abweichenden Eigenschaften im Tonmaterial als Einheit aufgenommen und nur eine MMN trat hervor (R. Winkler & Aehlig, 1998).

Insgesamt schränken diese oben genannte Mechanismen die Entdeckung eines abweichenden akustischen Reizes über die der MMN zu Grunde liegenden Mechanismen zeitlich ein.

1.3.2.2 Beteiligte neuronale Netzwerke und Korrelate in der Bildgebung

Die höchste Amplitude der MMN lässt sich über den frontozentralen Kopfarealen ableiten. Dies kann durch die Aktivität der bilateral supratemporal gelegenen Kortices erklärt werden (Jemel, Achenbach, Muller, Ropcke, & Oades, 2002; Rinne et al., 1999). Zusammenfassend beschreiben viele Arbeiten temporal sowie frontal gelegene kortikale Areale in der Genese der MMN (Alain, Woods, & Knight, 1998; Doeller et al., 2003; Jemel et al., 2002; Opitz, Rinne, Mecklinger, von Cramon, & Schroger, 2002; u.a. Rinne, Alho, Ilmoniemi, Virtanen, & Naatanen, 2000; Sabri et al., 2004). Schon bei Kindern lässt sich eine solche kortikale, örtliche Differenzierung gut finden (Gomot, Giard, Roux, Barthelemy, & Bruneau, 2000). Rinne, Alho et al. (2000) konnten zeigen, dass die frontalen und temporalen MMN-Quellen eine aufeinanderfolgende zeitliche Dynamik hatten und miteinander interagieren (Jemel et al., 2002; Tse, Rinne, Ng, & Penney, 2013). In der Studie von Alain, Words et al. (1998) wurde die Beteiligung der frontalen und temporalen Areale ebenfalls beschrieben. So war die MMN bei Hirnläsionen im temporo-parietalen sowie im dorsolateralen präfrontalen Kortex beeinträchtigt. Opitz, Rinne et al. (2002) nutzten eine kombinierte EEG-fMRT-Untersuchung und fanden eine Signalanhebung sowohl im superioren temporalen Gyrus (STG) und im Pars opercularis des rechten inferioren frontalen Gyrus (IFG). Das Maximum im STG korrelierte mit der frühen im EEG gemessenen MMN-Spitze bei 90 - 120 ms, das Maximum des IFG lag bei 140 - 170 ms und entsprach dem späten Gipfel der MMN. Bei Doeller, Opitz et al. (2003) wurden in EEG und fMRT-Untersuchungen ebenso eine zeitliche Differenzierung der Aktivierung der beteiligten Kortexareale vorgenommen. Dem temporalen Aspekt wird ein sensorisches Gedächtnis und den frontalen Anteilen eine kognitive, vergleichende Aufgabe zugeschrieben (Alain et al., 1998; Tse et al., 2013).

Den angeführten Studien widerspricht eine Untersuchung, die eine Aktivierung der frontalen MMN-Quelle bereits 94 ms nach Stimulus und somit 50 ms vor der Aktivierung des temporalen Anteiles beschreibt (Yago, Escera, Alho, & Giard, 2001).

Dies könnte laut Autoren in Zusammenhang mit thalamo-corticalen Netzwerken stehen, einer umgehenden und direkten Verbindung in den frontalen Kortex und einem dem Thalamus eigenen Mismatch-Erkennungsmechanismus.

Übergreifend kann von einem fronto-temporalen neuronalen Netzwerk ausgegangen werden, welches sukzessive und mit unterschiedlichen Aufgaben die Generierung der MMN in der Großhirnrinde übernimmt.

Eine Beteiligung des Hirnstammes in der Entdeckung von akustischen Veränderungen und in der Verschlüsselung auditiver Ordnungen erweitert die obigen Ergebnisse bezüglich der Beteiligung von Gehirnarealen (Slabu, Grimm, & Escera, 2012). Erst kürzlich konnten Cacciaglia, Escera et al. (2015) erstmals neben den oben angeführten beteiligten kortikalen Strukturen in einer Ereignis-korrelierten fMRT-Studie die Beteiligung niedriger gelegener Teile der Hörbahn des Menschen zeigen, wesentlich in den colliculi inferiores (IC) sowie im corpus geniculatum mediale (CGM). Weiter gehen die Autoren aufgrund ihrer Ergebnisse davon aus, dass das Erkennen von akustischen Veränderungen sowohl im IC als auch im CGL bereits mittels einer dortigen neuronalen Repräsentation der gleichbleibenden Eigenschaften des Inputs geschieht. Dies ist deshalb von Interesse und Bedeutung, da vom IC ausgehend eine auditive morphologisch-funktionale Aufgliederung (lemniscal und non-lemniscal) erfolgt und der IC als eine zentrale neuronale Stelle zu verstehen ist, die physikalische Eigenschaften des Tones zusammenfasst (Cacciaglia et al., 2015).

Ebenso von Bedeutung in der Informationsübertragung in neuronalen Netzwerken sind die beteiligten Transmittersysteme, welche im folgenden Abschnitt Erwähnung finden sollen.

1.3.2.3 Beteiligte Transmittersysteme

Für Untersuchungen der beteiligten Transmittersysteme in der Genese und Beeinflussung der MMN spielen Studien zum NMDA-Rezeptor eine führende Rolle. So konnten beispielsweise Umbricht, Schmid et al. (2000) eine signifikante Abnahme der MMN-Amplitudenspitze in gesunden Probanden unter der Gabe von Ketamin als

NMDA-Rezeptor-Antagonist nachweisen. Ein ähnliches Ergebnis brachte die Untersuchung von Kreitschmann-Andermahr, Roßberg et al. (2001) und auch Javitt, Steinschneider et al. (1996) konnten die bedeutsame Rolle der NMDA-Rezeptoren für die Entstehung der MMN nachweisen.

Für das dopaminerge und serotonerge Transmittersystem finden sich in den angeführten Studien divergente Ergebnisse, so dass noch weiterer Forschungsbedarf besteht (Kahkonen et al., 2005; Umbricht et al., 2003). So wurde in einer Auswasch-Studie, die den Effekt des Dopamins und des Serotonins jeweils einzeln und in Kombination auf die MMN messen wollte, keine Beeinflussung der MMN festgestellt (Leung et al., 2010). Betreffend die Langzeiteffekte in der Modulation dieser Systeme und dem Einfluss auf die MMN kann in dieser Untersuchung jedoch keine Aussage getroffen werden. Zu anderen Ergebnissen kommen Studien, die unter der Einnahme des selektiven Serotonin-Wiederaufnahme-Hemmers Escitalopram eine deutliche Zunahme der MMN fanden (Oranje, Jensen, Wienberg, & Glenthøj, 2008; Wienberg, Glenthøj, Jensen, & Oranje, 2010). Die Zielsetzung eines verbesserten Verständnis dessen wird Gegenstand weiterer Forschung bleiben.

Neben den bereits erwähnten Punkten stellte sich die Frage, wie sich unser Bewusstseinszustand auf die MMN auswirkt.

1.3.3 Aufmerksamkeit und Bewusstseinszustand

Ein kennzeichnender Aspekt der MMN ist, dass diese ausgelöst werden kann, ohne dass der Proband seine Aufmerksamkeit auf die präsentierten akustischen Signale lenkt (u.a. Alain, Woods, & Ogawa, 1994; Muller-Gass, Stelmack, & Campbell, 2005). Deshalb wird die MMN auch von einigen Autoren als ein Marker für die präattentive Wahrnehmung postuliert (Carral, Corral, & Escera, 2005; Naatanen et al., 2007).

So fand sich in Probanden, die in einem Versuch den Standardreiz vom Deviant nicht explizit unterscheiden konnten, die also entweder gar keine Änderung wahrnahmen oder aber die Änderung der Reize zwar bemerkten, diese jedoch nicht verbalisieren konnten, dennoch zu allen Zeitpunkten eine MMN (van Zuijlen, Simoens, Paavilainen,

Naatanen, & Tervaniemi, 2006). Die Autoren ordneten die MMN und den dazugehörigen neuronalen Prozess deshalb einem impliziten Wissen zu, einem Wissen, welches dem Bewussten nicht unbedingt zugänglich ist.

Der Begriff „präattentiv“, der bereits zu Diskussionen geführt hat (s.u.), könnte durch den Unterschied zwischen Aufmerksamkeit und Bewusstsein erklärt werden. Eine Unterscheidung findet sich bei N. Lavie, Beck, & Konstantiniou (2014), die zwischen Aufmerksamkeit von Bewusstsein unterscheidet und unter Bewusstsein einen Eindruck, eine Sinneserfahrung im weitesten Sinne, versteht, die einer Verbalisierung zugänglich ist. Und die MMN als ein Marker, der auch nicht mehr verbalisierbare Änderungen in einem akustischen Reizmuster darstellt, kann demnach als vorbewusst und damit in weiterer Übersetzung als präattentiv angesehen werden.

Im Gegensatz dazu erachten Sussman, Chen et al. (2014) den Begriff „präattentiv“ für nicht zutreffend und zu ungenau. Nach Meinung der Autoren besteht auf neuronaler Ebene keine vorbewusste Aufmerksamkeit, alles wird wahrgenommen. Sie beziehen sich darauf, dass sich der Begriff der Aufmerksamkeit in den vergangenen Jahren doch deutlich verändert und erweitert habe. Die Handlungsanweisung an den Probanden, die akustischen Reize zu ignorieren, begründe nicht die Idee, dass die MMN „präattentive“ Prozessierungen spiegeln würde. Es sei zielführender, in den Aufzeichnungsbedingungen selbst zu unterscheiden und in der Beschreibung der Versuchsanordnung den Ort anzuführen, auf den die Aufmerksamkeit gelenkt bzw. gerichtet wird. Daraus ergibt sich die Differenzierung einer „aktiven“ versus einer „passiven“ Versuchsanordnung ohne direkten Bezug auf das Bewusstsein. Auch Aukstulewicz und Friston (2015) zweifeln an der „präattentiven“ Beschaffenheit der MMN. Dennoch kann man die MMN als eine zeitlich eben vor denjenigen ERP-Komponenten auftretende Welle beschreiben, welche in Zusammenhang mit Aufmerksamkeitsprozessen stehen, so zum Beispiel vor der P3a (Friedman et al., 2001).

Trotz aller Diskussion kann der Fokus und auch die Art der Aufmerksamkeit eine Modifikation der MMN mit sich bringen. Muller-Gass, Stelmack et al. (2005) und Kramer, Trejo und Humphrey (1995) stellten Auswirkungen auf die MMN-Amplitude

durch von den akustischen Stimuli weggerichtete Aufmerksamkeit fest. In der Untersuchung der Autoren um Muller-Gass (2005) wurden Bedingungen verglichen, bei denen eine Probandengruppe während der Präsentation der akustischen Stimuli still einen Text lesen sollte, zu dem sie danach befragt wurden, während die Kontrollgruppe einfach nur still da saß. In ersterer Gruppe konnte eine vergrößerte MMN-Amplitude bei einem Deviant, gekennzeichnet durch eine geringere Lautstärke, gemessen werden. Die Forschergruppe um Kramer (1995) ließ ihre Probanden während der Darbietung der akustischen Reize Aufgaben lösen, die in ihren Anforderungen, genannt „workload“, verschieden hoch waren. In der Bedingung mit den geringen Anforderungen nahm die MMN ab um dann in der Bedingung mit dem hohen Workload über das Ausgangsniveau hin zuzunehmen.

In ihrer Versuchsanordnung konnten Sussman, Winkler et al. (2003) keine Beeinflussung der MMN durch auf andere Tondarbietungen gerichtete Aufmerksamkeit messen, außer die Töne als solche überschritten sich in der relevanten und nicht-relevanten Spur in ihren Eigenschaften oder es waren spezifische Aufgaben damit verknüpft. In diesem Kontext folgern Sussman, Chen et al. (2014), dass nicht die Aufmerksamkeit als solche direkt die MMN beeinflusst, sondern die Gedächtnisstruktur und die Analyse der akustischen Eindrücke dafür verantwortlich ist. Diese erst sind dann wiederum direkt mit Art der Entstehung der MMN assoziiert.

Während die bislang genannten Studien von wachen Probanden ausgingen konnte auch in einigen Schlafstadien, zum Beispiel im Schlafstadium 1 und im REM-Schlaf, eine MMN abgeleitet werden (Atienza, Cantero, & Dominguez-Marin, 2002; Ruby, Caclin, Boulet, Delpuech, & Morlet, 2008). Selbst bei in Patienten im Koma (Kane et al., 1996) ließ sich ein MMN ableiten und konnte zudem prädiktiv für das Wiedererlangen von Bewusstsein eingesetzt werden (Fischer, Luauté, Adeleine, & Morlet, 2004; Morlet & Fischer, 2014). Ähnliche Ergebnisse konnten für Patienten im Wachkoma gefunden werden (Wijnen, van Boxtel, Eilander, & de Gelder, 2007). Dies

spricht für eine hohe Automatisierung dieses Prozesses überwiegend unabhängig vom Bewusstseinszustand des Probanden.

Dies veranlasste Näätänen (2000) dazu, von idealen Aufzeichnungsbedingungen für die MMN auszugehen, wenn passive Bedingungen gewählt werden, der Proband seine Aufmerksamkeit zum Beispiel auf einen visuellen Input lenkt. Somit besteht nicht die Gefahr der Überlagerung der MMN durch andere, durch Aufmerksamkeit beeinflusste ERP-Komponenten, wie sie zum Beispiel die N2b oder die P3 darstellt (Muller-Gass et al., 2005).

Neben den oben aufgeführten Grundlagen finden sich in der Literatur verschiedene andere hypothetische Modelle, welche die der MMN zugrunde liegenden Mechanismen erklären sollen. Auf diese soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

1.3.4 Neurobiologische Hypothesen zur Genese der Mismatch Negativity

1.3.4.1 Die „model-adjustment“-Hypothese

Eine der seit langer Zeit am weitesten verbreitete Annahmen ist, dass die MMN ein Marker für die Fehler-Entdeckung in einem auditiven, im sensorischen Gedächtnis hinterlegten Reizmuster ist (Tiitinen, May, Reinikainen, & Naatanen, 1994). Dies tritt immer dann in Erscheinung, sobald eine Regel gebrochen wird. Die entstehende Diskrepanz zwischen dem aktuellen und dem zuvor eingegangenen Reiz ergibt den „mismatch“, und das entsprechende Hirnstrom-Äquivalent ist dann die MMN.

So geht die „model-adjustment“-Hypothese davon aus, dass die MMN als Ausdruck einer mitlaufenden Modifikation dann hervorgerufen wird, wenn im Verhältnis zu der Vorhersage, welche aufgrund einer auditiven Gedächtnisspur des vorangehenden Inputs generiert wird, eine Änderung des eingehenden auditiven Stimulus bemerkt wird (Garrido et al., 2009; Naatanen & Winkler, 1999; E. Sussman & Winkler, 2001; I. Winkler, Karmos, & Naatanen, 1996). Dies wird auch von Maess, Jacobsen et al. (2007) unterstützt, die davon ausgehen, dass die MMN einen kognitiven Prozess widerspiegelt, dem ein Vergleichsaspekt auf dem Boden der auditiven sensorischen

Gedächtnisses zugrunde liegt. Diese Hypothese stützt sich weiter auf das Vorhandensein der verschiedenen, an der MMN-Genese beteiligten kortikalen Areale, von denen dem temporalen Anteilen ein Sinnesgedächtnisaspekt und den frontalen Anteilen eine kognitive, vergleichende Funktion zugeschrieben wird (s. Kap. 1.1.2.3).

1.3.4.2 Die Adaptationshypothese

Die „model-adjustment“-Hypothese wird von Jääskeläinen, Ahveninen et al. (2004) in Frage gestellt und eine alternative Genese der MMN postuliert. Die Autoren gehen von einer Adaptation, also einer Anpassung der Rezeptoren an die vorhandene Reizstärke (Klinke, 2005), der die N1 generierenden Neurone im auditorischen Kortex, aus. Deren Erregbarkeit nimmt unter repetetiver Stimulation ab und somit entsteht eine verzögerte und verminderte N1. Dadurch wird bei Subtraktion des Standards vom Deviant in den entsprechenden, gemittelten EEG-Segmenten die MMN fälschlicherweise als eine eigentlich der N1 zuordenbare Welle fehlinterpretiert. Die N1 stellt die im EEG ableitbare negative Antwort 100 ms nach Eingang eines akustischen Stimulus dar und wird als Merkmal des neuronalen Erkennens eines eingehenden akustischen Reizes gewertet (Jaaskelainen et al., 2004). Die Autoren berufen sich auf das Vorhandensein einer zweigeteilten N1 mit einem posterioren Anteil, der N1p, die nach 85 ms gipfelt, sowie einem anterioren Anteil, mit einem Maximum nach 150 ms (Loveless, Levanen, Jousmaki, Sams, & Hari, 1996). Der zuletzt genannte Teil wird in sich wiederholenden Stimuli deutlicher unterdrückt als die posteriore Komponente. Somit wird von einer N1-Differenz ausgegangen, die dann entsteht, wenn die ERP-Welle des Standards von der des Deviants abgezogen wird. Dies würde der Theorie einer eigenen, unabhängigen Genese der MMN widersprechen.

Die Adaptationshypothese wird von einigen Autoren in einigen Punkten infrage gestellt (Garrido et al., 2009; Naatanen et al., 2007). Zum einen fallen die zeitlichen Komponenten nicht exakt zusammen, so entspricht die N1p nicht der MMN-Latenz. Außerdem lässt sich nicht ausreichend erklären, weshalb eine MMN ohne das Vorhandensein einer N1-Welle, wie zum Beispiel in bestimmten Schlafstadien

(Atienza et al., 2002), generiert werden kann. Auch die Versuchsanordnungen, die eine MMN durch das Weglassen eines Stimulus (Yabe et al., 1997) oder in einem abstrakteren auditiven Kontext (Paavilainen et al., 2003) hervorriefen, lassen sich nicht mit der Adaptationshypothese in Einklang bringen. Ebenso konnte in NMDA-Rezeptor-Antagonisten-Studien gezeigt werden, dass diese wohl die MMN, nicht aber den primären auditiven Kortex und die N1 beeinflussen (Javitt et al., 1996; Umbricht et al., 2000). Dies spricht für unterschiedliche neuronale Population sowie unabhängige Prozesse in der Entwicklung dieser beiden Elemente.

1.3.4.3 Prädiktives Kodieren

Das Model des prädiktiven Kodierens führt die beiden in den oberen Abschnitten angeführten Hypothese zusammen (Garrido et al., 2008; Garrido et al., 2009). Hier wird angenommen, dass der MMN-Entstehung sowohl lokale neuronale Anpassungsphänomene als auch ein temporo-frontales Netzwerk analog dem Gedanken der „model-adjustment“-Hypothese zugrunde liegen. Die genannten Autoren berufen sich hierbei auf Untersuchungen von Friston (2005), der sich mit Lernprozessen im Gehirn, Wahrnehmung und mathematisch begründeten Vorhersagen über entstehende Umwelteindrücke beschäftigt hat. Er geht davon aus, dass unser Gehirn im Rahmen von Optimierungsprozessen zur Einsparung von Energie bemüht ist, indem in der Umwelt entstehende Eindrücke auf den wahrscheinlichsten Grund zurückgeführt werden sollen um Vorhersagefehler zu vermeiden und somit Energie einzusparen (Friston, 2010b; Friston & Kiebel, 2009). Diese Annahme beruht auf statistischen Theorien und Berechnungen und hier im wesentlichen dem Satz von Bayes. In diesem werden über eine maximale Annäherung Vorhersagen über sensorische Eindrücke im Gehirn beschrieben und dann mit weiteren Lernprozessen verknüpft. Dies bietet eine mögliche theoretische Grundlage, wie das Gehirn Voraussagen über die Umwelt generiert und gegebenenfalls anpasst. Diesem Gedanken liegt die Annahme der hierarchischen Organisation der sensorischen Kortex-Areale zugrunde, die über aufsteigende und absteigende Bahnen miteinander verbunden sind und interagieren (Friston, 2003; K. J. Friston, 2005). Über die absteigenden Bahnen können höher gelegene

neuronale Gefüge Vorhersagen an tiefer gelegene Strukturen mitteilen. Vorhersagen über neuronale Dynamiken werden so kontinuierlich mit dem aktuellen Reizeingang aus tiefer gelegeneren Strukturen verglichen und adaptiert (Friston, 2008). Somit erfolgt bei zutreffender Voraussage über einen sensorischen Eindruck die Unterdrückung des Vorhersagefehlers, welcher über deszendierende neuronale Verknüpfungen von hierarchisch höher gelegenen Strukturen nach unten vermittelt wird.

Was die MMN betrifft lassen sich nun diese zwei Punkte folgendermaßen zusammenführen: zum einen erfolgt eine Abschwächung der N1 durch repetitive Stimuli i.S. eines unterdrückten Vorhersagefehlers. Zum anderen erfolgt über eine neuronale Anpassung im temporo-frontalen Netzwerk eine zusätzliche hierarchisch organisierte Vorhersage bzw. der Abgleich des aktuellen Inputs mit der Vorhersage über den kommenden Stimulus über wechselwirkende Bahnen. Dieser Theorie entspricht in Zügen dem Gedanken der Gedächtnisspur, welche aus hierarchischer Perspektive abwärts strukturierte Vorhersagen beinhaltet. So wird immer dann das Modell angepasst, wenn ein Fehler der Vorhersage auftritt. Dem entsprechen die Ergebnisse von Lee und Sherman (2011), die synaptische Eigenschaften der komplex verschränkten, glutamatergen auditiven Neurone über das Mittelhirn, den Thalamus und den Cortex hinweg in zwei Hauptgruppen unterteilen, die informationstragenden Neurone neben den Neuronen, denen eine regulierende Eigenschaft zugeschrieben wird. Sowohl tektothalamisch als auch thalamocortikal, cortikothalamisch und intracortikal sind beide Neuronengruppen vertreten, so dass zwischen all diesen Strukturen Informationsfluss und -regulation möglich ist.

Eine dies auf neurophysiologischer Ebene weiter untersuchende Studie ist die von Todorovic und de Lange (2012). Die Autoren beschäftigen sich mit der Frage nach dem Einfluss auf die Suppression neuronaler Aktivität durch sich wiederholende Stimuli versus einer Suppression neuronaler Aktivität bei erwarteten Stimuli. Eine zeitliche Differenzierung ergab einen klaren Hinweis der Beteiligung der Suppression bei erwarteten Stimuli in der Genese der MMN. Diese Suppression durch repetitive Stimuli war im ERP bei ca. 40 - 60 ms nach Stimuluspräsentation sichtbar, die der erwarteten Stimuli trat in einem Zeitfenster 100 - 200 ms, was zeitlich mit der MMN

übereinstimmt. Auch Wacongne, Changeux et al. (2012) sehen aufgrund ihrer Ergebnisse die MMN eher als Resultat einer vom Kortex ausgehenden, NMDA-Rezeptor assoziierten Vorhersage denn als Folge synaptischer Habituation.

Die Theorie des prädiktiven Kodierens findet auch Eingang und Bestätigung in der Studie von Auksewicz und Friston (2015), die die MMN, weitestgehend, über Veränderungen in extrinsischen neuronalen Verknüpfungen erklärt. Diese Verknüpfungen vermitteln eingebettet in hierarchische Kontexte sensorische Eindrücke, generieren Vorhersagefehler und sind in den Lernprozess bei Regelmäßigkeiten des Stimulus im Gehirn mit einbezogen.

Der Gedanke des prädiktiven Kodierens in Zusammenhang mit der MMN wird von Lieder, Stephan et al. (2013) weitergeführt und auf eine theoretisch-mathematische Ebene übertragen und ergänzt. Ziel dieses Modells ist es Hypothesen zu untersuchen, wie das Gehirn Informationen verarbeitet um lernfähiges Verhalten zu entwickeln. Der zeitliche, intrazerebral angenommene Verlauf der Vorhersagefehler wird hier als Kurvenfunktion verwendet und die MMN nachgestellt. Es zeigte sich, dass eine Übertragung dieser Annahmen in mathematische Formeln der Genese der MMN eine sehr exakte Darstellung ermöglicht. In einer zuvor im gleichen Jahr erschienenen Studie von Lieder, Daunizeau et al. (2013) wurden auf einer mathematischen Ebene drei Hypothesen zur Genese der MMN, das prädiktive Kodieren, die „model-adjustment“ Hypothese und die Erkennung von Neuem, überprüft und mit Daten aus Probandenversuchen verglichen. Die Ergebnisse sprechen nach Meinung der Autoren dafür, dass der die MMN generierende Prozess eine Anpassung eines wahrscheinlichkeitsbasierten Modells an die Umgebung ist. Grundlage sind dabei Vorhersagefehler, die durch die MMN den Lernprozessen entsprechend Berechnungen nach Bayes zugeordnet werden können. Dies deckt sich mit der Idee des prädiktiven Kodierens.

Insgesamt lässt sich trotz der Fülle der Ergebnisse, welche für das prädiktive Kodieren sprechen, der der MMN zugrunde liegende Mechanismus nicht eindeutig einzig einer Hypothese zuordnen und es gilt zu bedenken, dass sich die Ansätze nicht notwendigerweise gegenseitig ausschließen sondern möglicherweise in Teilen

gegenseitig ergänzen können (Fishman, 2014; Garrido et al., 2009; Wacongne et al., 2012).

1.3.5 Einflussfaktoren auf die MMN

1.3.5.1 Emotionale Zustände des Probanden

Eine Erwartungsangst zeigte eine Auswirkung auf die MMN. In ihrem Versuchsaufbau konnten Cornwell und Mitarbeiter (2007) bei gesunden Probanden unter Erwartung eines elektrischen Schocks eine Zunahme der MMNm messen. Die Vergleichsgruppe waren Versuchspersonen, die einer solchen Anspannung und Erwartungsangst nicht ausgesetzt waren, da sie keine Schocks erwarteten. In dieser Untersuchung kann der erwartete Schock im Sinne einer erwarteten Schädigung des Organismus gesehen werden, was mit einer erhöhten Angst und Anspannung einhergeht. Somit kann von einer Beeinflussung der MMN und respektive der präattentiven Wahrnehmung ausgegangen werden, wenn sich Probanden in einem erwartungsvoll ängstlichen und möglicherweise auch bedrohten Zustand befinden.

Weitere Untersuchungen beschäftigten sich mit der Frage nach vorbestehenden emotional veränderten Zuständen im Rahmen von psychiatrischen Erkrankungen der Probanden und deren Auswirkungen auf die MMN.

Bei Probanden mit einer depressiven Erkrankung wurde in Studien eine Abnahme der Amplitude der MMN gemessen (Naismith et al., 2012; Qiao et al., 2013; Restuccia, Vollono, Scaloni, Buccelletti, & Camardese, 2016). Dies wird in Zusammenhang mit den der Erkrankung inhärenten neuronalen und sich kognitiv manifestierenden Veränderungen gebracht.

Ein erlebtes Trauma stellt eine maximale emotionale Belastung dar. Daher verwundert es nicht, dass die MMN bei Menschen mit einer Posttraumatischen Belastungsstörung vergrößert ist (Morgan & Grillon, 1999). In neueren Studien fanden sich diesbezüglich divergente Ergebnisse, ein eindeutiger Zusammenhang konnte so nicht mehr bestätigt werden. Insgesamt muss hier nach Ansicht der Autoren Löw et al. (2019) von komplexeren Zusammenhängen ausgegangen werden.

Auch lassen sich für andere psychiatrische Erkrankungen Beeinflussungen der MMN nachweisen. Wie bereits weiter oben erwähnt verändert sich bei Patienten mit einer Alzheimer-Erkrankung die MMN infolge der Abnahme der Gedächtnisspur. Zudem finden sich eine hohe Zahl an Studien, die sich mit veränderter MMN bei Patienten mit einer Schizophrenie beschäftigen (u.a. Michie, Malmierca, Harms, & Todd, 2016; Rosburg, Kreitschmann-Andermahr, & Sauer, 2004).

1.3.5.2 Emotionale akustische Stimuli

Einige Wissenschaftler haben den Einfluss von akustisch vermittelter Emotion auf die MMN untersucht. Schirmer und Escoffier (2010) kreierten hierzu in Untersuchungsaufbau, bei dem die Probanden, während sie einen Stummfilm ansahen, Tonreizen aus von einer Stimme gesprochenen Silben mit zweierlei sich unterscheidenden Deviants ausgesetzt waren. Diese differierten hinsichtlich ihres emotionalen Gehalt, indem eine ärgerliche vs. eine neutrale Stimme zu hören war. Die MMN ausgelöst durch die ärgerliche Stimme erwies sich als vergrößert. Gleichzeitig konnte eine Zunahme der Herzrate gemessen werden. Die Autoren sehen einen Zusammenhang zwischen einem bedrohlichen Stimmreiz und vorbewusster Verarbeitung sowie der Aktivierung des sympathischen Nervensystems. Je höher das Angstlevel des jeweiligen Probanden war, desto deutlicher hoben sich auch Herzrate und MMN ab.

Eine andere Studie maß eine Amplitudenänderung der MMN in einer Versuchsbedingung, in der die Deviants von den Standards durch ihre Rauheit abwichen (De Baene, Vandierendonck, Leman, Widmann, & Tervaniemi, 2004). Diese stellt ein akustisches Merkmal dar, welches Töne erheblich unangenehm macht und somit auch als aversiver Reiz betrachtet werden kann. Die MMN-Amplitude nahm zu, wenn die Rauheit als stärker empfunden wurde. Daher wurde von den Autoren geschlussfolgert, dass dieses Merkmal auf einer vorbewussten Ebene encodiert ist.

Chen, Chan und Cheng (2018) konnten in ihrer Studie zuverlässig eine MMN ableiten, in der die Standards neutral gesprochene Silben, während die

abweichenden Reize entweder fröhlich oder auch ärgerlich gesprochene Silben darstellten.

Eine andere Forschergruppe verglich die durch dreierlei verschiedene Deviants hervorgerufene MMN (Goydke et al., 2004). Die Deviants wichen vom Standard in emotionaler Valenz, Tonhöhe sowie in der Klangfarbe ab. In allen Bedingungen konnte eine MMN abgeleitet werden. Von Seiten der Autoren wird die Frage aufgeworfen, ob die emotionale Qualität oder nicht eher die differierende physikalische Eigenschaft die MMN auslöst.

1.3.5.3 Visuelle Beeinflussung

Der Zusammenhang des Grades der Aufmerksamkeit auf einen visuellen Input gerichtet und die zugleich abgeleitete auditive MMN, hervorgerufen durch nicht beachtete akustische Stimuli, wurde in verschiedenen Studien untersucht (u.a. Haroush, Hochstein, & Deouell, 2010; Muller-Gass et al., 2005; Yucel, Petty, McCarthy, & Belger, 2005). Es zeigte sich, dass immer eine MMN abgeleitet werden konnte, allerdings fanden sich Beeinflussungen in Form einer Abnahme der MMN mit Zunahme der Dichte bzw. des Informationsgehaltes des visuellen Inputs. Dies konnten auch Wiens, Szychowska und Nilsson (2016) bestätigen, wobei die Autoren die Notwendigkeit weiterer Studien aufzeigten.

Im folgenden sollen Emotionen, Versuchsaufbauten zur Emotionsinduktion sowie deren Messung und physiologische Reaktionen genauer betrachtet werden.

1.4 Das International Affective Picture System

1.4.1 Emotionen - Grundgedanken

Unter dem Begriff der Emotion kann ganz generell die Gemütsbewegung oder der Affekt verstanden werden (Hoffmeister, 1955). Neben „Affekt“ findet auch die Bezeichnung „Gefühl“ Verwendung. Hierunter können vielfältigste Phänomene

subsummiert werden. Insgesamt wird der Begriff der Emotion meist mit auftretenden Erlebnissen oder Empfindungen in Verbindung gebracht, wenn diese für das Subjekt von Bedeutung sind und zudem mit spezifischen körperlichen Veränderungen und charakteristischen Verhaltensweisen verbunden sind (Jordan & Nimtz, 2009).

Zusammenfassend finden sich in der Literatur verschiedenste Ansätze zur Erklärung, Einteilung und zum Verständnis von Emotionen. Ebenso finden sich diverse methodische Ansätze und Stimulusmaterial, um emotionale Zustände zu induzieren und zu messen. Neben Bildern werden Filme, Geräusche, Wörter, Geschichten als potentielle Stimuli verwendet (Cacioppo & Gardner, 1999). Nachdem es den Rahmen dieser Arbeit weit überschreiten würde, auf sämtliche Grundgedanken betreffend die Einteilung von Emotionen und deren Messmethoden genauer einzugehen sowie verschiedene Modelle zu diskutieren, soll in der Folge nur das für die vorliegende Studie verwendete Verständnis von Emotionen genauer erläutert werden.

1.4.2 Emotionsmodell nach P.J. Lang

Ausgehend von Ergebnissen aus der Tierforschung gehen die Autoren um P.J. Lang davon aus, dass sich im menschlichen Gehirn zwei basale, über den Zeitraum der Evolution hinweg entstandene Reflexantworten auf Außenreize finden, welche in einem Abwehr- und einem Hinwendungssystem organisiert sind. Diese divergenten Muster können im Sinne eines neuronalen Überlebensnetzwerkes gesehen werden (u.a. Lang, 2014; Lang & McTeague, 2009). Die Reflexmuster bzw. neuronalen Verbindungen können dann, wenn sie durch Registrierung eines Stimulus aktiv sind, als aufeinanderfolgende, autonome und somatische Reflexe beschrieben werden und bilden die Grundlage für die Wahrnehmung von Emotionen aus menschlicher Sicht (Lang & Bradley, 2010).

Auch wenn es eine Vielzahl an Ausdrucksformen für Gefühlsregungen gibt, berufen sich die Autoren auf eine zweidirektionale Organisation des affektiven Gefüges auf Grundlage eines motivationalen Systems (u.a. Cacioppo & Gardner, 1999; Lang, 1995; Lang, Bradley, & Cuthbert, 1998a). Diese Annahme steht in Einklang mit dem Grundgedanken, dass Emotionen eine motivierende Kraft innewohnt (Frijda, 1986; Jordan & Nimtz, 2009). Dieses Emotionssystem wird als zielgerichtet und dynamisch

verstanden, es kann eine Einteilung in einen appetitiven und einen aversiven Schenkel vorgenommen werden. Die affektive Wertigkeit einer Emotion wird folglich von dem vorherrschenden motivationalen System bestimmt. Emotionen entstehen somit dann, wenn appetitive oder aversive Signale diese oben genannten primitiven Gehirnkreise und einhergehende physiologische Reflexe aktivieren und in den Personen ein Bewusstsein hierfür existiert. Der appetitive Bereich oder auch das Hinwendungsverhalten moduliert mitunter Nahrungsaufnahme oder auch die Sexualität und ist positiv konnotiert. Das Abwehrsystem des aversiven Teiles spielt die entscheidende Rolle für Flucht- und Kampfverhalten und findet eine negative Entsprechung (dies und vorangehendes u.a. Lang, 2014; Lang & Bradley, 2010; Lang et al., 1998a; Lang, Bradley, & Cuthbert, 1998b).

Neben dieser motivationalen Grundstruktur spielt die Aktivierung oder Erregung, das Arousal, eine entscheidende Rolle für die Intensität dieses Gefühls. Diese ist unabhängig von der Richtung des Affektes, also appetitiv oder aversiv (Lang et al., 1998a). Somit kann die Emotion in einem System mit zwei Achsen aus Wertigkeit und Erregung auch als ein handlungsvorbereitender Zustand des Organismus angesehen werden (Lang, 1995). In der Folge kann, beispielsweise nach Aktivierung der appetitiven Ausrichtung, Verhalten in Richtung des angenehmen Stimulus vorbereitet werden. Analoges gilt für die Möglichkeit des Rückzuges von einem negativen Stimulus bei Aktivierung des aversiven Schenkels. Die resultierende Emotion stellt also eine neuronale Antwort auf einen Stimulus dar, in der sensorische Systeme hinzugenommen werden, um die Aufmerksamkeit zu verbessern oder auch um Wahrgenommenes besser verarbeiten zu können. Gleichzeitig kann mit physiologischen Reaktionen auf Stimuli die Vorbereitung einer möglichen Handlung erfolgen, Funktionen, die die physiologischen Manifestationen unserer emotionalen Ausdrücke darstellen (Lang & Bradley, 2010).

In der Konsequenz finden sich Emotion entsprechend ihrem Verständnis nach den oben aufgeführten Autoren als messbarer Wert auf zwei Achsen. Eine Achse, die sich repräsentativ für das Arousal zwischen „ruhig“ und „erregt“ spannt, und einer zweiten Achse, welche die motivationale Grundstruktur zwischen angenehm und unangenehm beschreibt (Lang et al., 1998a). Anders formuliert können Emotionen,

auch wenn sie sich in vielfältigster Weise präsentieren können, in ihrem Grundsatz über die beinhaltenden motivationalen Anteile auf die beteiligte affektive Wertigkeit und den Erregungszustand zurückgeführt und hierüber beschrieben werden (Lang et al., 1998a).

In der bio-informationalen Theorie (Lang, 1979) wird davon ausgegangen, dass emotionale Bilder im Gedächtnis in einem assoziativen kortikalen Netzwerk eingebettet sind, welches Repräsentationen des Stimulus enthält. Solche Repräsentanzen betreffen die Verhaltens- und physiologische Antwort sowie Repräsentationen über deren Bedeutung (Lang & McTeague, 2009). Diese Stimuli in Form von Bildern werden in dem im folgenden Abschnitt besprochenen International Affective Picture System genutzt um diese kortikalen Netzwerke anzusprechen.

1.4.3 Aufbau des International Affective Picture System

Bei dem International Affective Picture System (IAPS) handelt es sich um eine Zusammenstellung verschiedenster farbiger Bilder, die als normiertes visuelles Stimulusmaterial im experimentellen Setting genutzt werden können, um emotionale Zustände in einer Versuchsperson zu induzieren (Lang et al., 1998a, 1998b). Dieser Bildersammlung liegt die oben genannte Annahme zum Aufbau der Emotionen zugrunde, also einer Lokalisierung und Definition des jeweiligen Zustandes in einem zweierichteten System mit einer Valenz- und einer Arousal-Achse. Die im IAPS enthaltenen Bilder sind exakt kalibriert, standardisiert und jedem Bild ist ein Wert aus der Achse des Arousal und der des Wohlbefindens zugeordnet, so dass eine wissenschaftliche Erforschung von Emotionen über die Präsentation von Bildern möglich wird. Die Bilder werden einem meist sitzenden, also passivem Beobachter vorgeführt um darüber eine bzw. die gewünschte emotionale Reaktion zu erzeugen. Bilder aus dem Bereich der angenehmen Stimuli beinhalten mitunter freundliche Gesichter, Tierbabys oder erotische Szenen, neutrale Bilder zeigen beispielsweise Haushaltsgegenstände, unangenehme Bilder lassen bedrohliche oder Gewaltszenen und blutige Verletzungen erkennen.

Bei der Präsentation der Bilder spielt die zeitliche Dauer nur sehr bedingt eine relevante Rolle. So konnten in einer Versuchsanordnung, in der die

Präsentationsdauer bei 500 ms lag vergleichbare emotionale Reaktionen hervorgerufen werden verglichen mit einer Präsentationsdauer von 6s. Einzig die Beeinflussung der Herzrate war von der Zeitspanne abhängig (Codispoti, Bradley, & Lang, 2001).

An dieser Stelle ist anzumerken, dass oben beschriebenes Bildsystem und die entstehenden, gemessenen emotionale Reaktionen für Personen ohne psychische Erkrankungen gilt. So können selbstverständlich Reaktionen auf Bilder auch interindividuell unterschiedlich ausfallen, zum Beispiel bei Menschen mit phobischen Störungen. Diese weisen eine deutlich ausgeprägtere Reaktion auf Bilder mit entsprechenden Darstellungen phobisch besetzter Inhalte auf als gesunde Probanden (Lang & McTeague, 2009).

Körperreaktionen sind nicht nur Menschen mit phobischen Störungen unter Präsentation der spezifischen und angstauslösenden Stimuli bekannt, sie sind auch in Gesunden ein Teil der mitunter spürbaren physiologischen Antworten auf emotionale Reize. Im nächsten Abschnitt soll auf diese Reaktionen genauer eingegangen werden.

1.4.4 Emotionen und physiologische Reaktionen

1.4.4.1 Emotionen und autonomes Nervensystem

Emotionen sind auch unter dem Gesichtspunkt von physiologischen Prozessen zu betrachten, welche einen wesentlichen Anteil am gesamtheitlichen Verständnis der emotionalen Antworten tragen (LeDoux, 1995). Physiologischen Reaktionen spielen eine wichtige und hier zu erwähnende Rolle im Zusammenhang mit den mit emotionalen Reizen einhergehenden Reflexen. So stellt die Aktivierung des autonomen Nervensystems (ANS), bestehend aus Sympathikus und Parasympathikus (Trepel, 2004), eine wichtige Funktion und Gegenstand breiter Untersuchungen im Kontext von Emotionsforschung dar, wird in seiner Bedeutung und Spezifität jedoch kontrovers diskutiert (Kreibig, 2010). Generell kann davon ausgegangen werden, dass diese physiologischen Mitreaktionen den Körper auf Bewältigungsstrategien der jeweiligen Situation vorbereiten (u.a. Lang & Bradley,

2010). Diese autonomen Reaktionen sind in verschiedenen Parametern technisch messbar und ableitbar. Hierbei bilden kardiovaskuläre, respiratorische, und elektrodermale Messungen sich ergänzende Informationen, um die Funktionsweise des ANS in Emotionen besser zu verstehen (Kreibig, 2010). Im Folgenden werden nur über Bilder des IAPS erzeugte Emotionen und deren Korrelation mit dem ANS angeführt.

Zunächst soll nun also das autonome Nervensystem erwähnt werden, welches z.B. bei gezeigten angenehmen oder unangenehmen Bildern und entsprechenden emotionalen Zuständen verstärkt reagiert (E. M. Bernat, Cadwallader, Seo, Vizueta, & Patrick, 2011; u.a. Bradley, Codispoti, Cuthbert, & Lang, 2001; Cuthbert, Schupp, Bradley, Birbaumer, & Lang, 2000; Hermans, Henckens, Roelofs, & Fernandez, 2013; Vico, Guerra, Robles, Vila, & Anllo-Vento, 2010). Sympathikus- und Parasympathikusaktivität finden sich in unterschiedlichen Anteilen in emotionalen Zuständen wieder. Insgesamt kann von einer Coaktivierung beider Schenkel ausgegangen werden (Hermans et al., 2013). So findet sich in Studien mit erregenden, angenehmen Bildern ein Überwiegen der Sympathikusaktivität, die in Hautleitfähigkeit und Pupillenweite messbar ist (Bradley, Miccoli, Escrig, & Lang, 2008). Bei erregenden, aber unangenehmen Bildern kann eine Mitreaktion des Parasympathikus mit Abnahme der Herzrate durch Zunahme des Vagustonus sowie motorische Hemmung und die Vermittlung des „freezings“ in bedrohlichen Situationen gemessen werden (Bradley et al., 2001). Die Abnahme der Herzrate bei unangenehmen oder bedrohlichen Zuständen wird auch als „Angst-Bradykardie“ (u.a. Lang & Bradley, 2010) bezeichnet, die sich erst bei Handlungsnotwendigkeit in einer bedrohlichen Situation löst (Low, Lang, Smith, & Bradley, 2008). Eine Zunahme des Atemwegswiderstandes gesunder Probanden konnte zudem bei positivem und negativem verglichen mit der Präsentation von neutralem Bildmaterial gemessen werden. Es fand sich in den weiteren erhobenen atmungsspezifischen Parametern keine Beeinflussung durch den emotionalen Zustand (Ritz, George, & Dahme, 2000). In letztgenannten Ergebnissen zeigt sich deutlich, dass die autonome Reaktion nicht einfach und eindimensional erklärbar sondern weitaus komplexer ist und noch weiterer Forschung bedarf. Es finden sich

insgesamt nur wenige Studien, die sich mit der Messung respiratorischer Parameter in Korrelation mit dem IAPS beschäftigen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt bei kardiovaskulären Daten.

Eine weiterführende Unterteilung der autonomen Reaktionen entsprechend den thematischen Inhalten der Bilder findet sich in einigen Studien (E. Bernat, Patrick, Benning, & Tellegen, 2006; E. M. Bernat et al., 2011; Bradley et al., 2001; Lang, Greenwald, Bradley, & Hamm, 1993). So spielt der motivationale Aspekt, also die Frage, wie notwendig sich eine Handlung anschließen könnte, eine entscheidende Rolle, was die Ausprägung der physiologischen Antworten betrifft. So erzeugen in der Gruppe der unangenehmen Bilder diejenigen eine verstärkte reflektorische Antwort, die bedrohliche Inhalte aufweisen in Relation zu solchen, die mit Ekel verknüpften waren. Gleiches gilt für erotische Bilder aus dem positiv assoziierten Kontext. Eine größere Reaktion, welche auch i.S. einer verstärkten Hemmung zu verstehen ist, ist dann messbar, wenn die Bilder einen erotischen Inhalt haben, verglichen mit anderen angenehmen Bildern, beispielsweise Abenteuer-Bildern.

Das ANS zeigt partielle Unterschiede in Reaktionsmuster je nach Valenz des Stimulus, also ob ein als angenehm oder unangenehm empfundener Reiz dargestellt wird, differenziert aber nicht sicher zwischen diesen Wertigkeiten und ist somit eher mit dem Grad der Erregung assoziiert, welcher mit den jeweiligen Emotionen einhergeht (Lang & Bradley, 2010). Von einer eins-zu-eins-Umsetzung zwischen Emotion und physiologischen Veränderungen kann in keinem Fall aufgegangen werden, da sowohl emotionale Veränderungen ohne Beteiligungen des ANS und vice versa denkbar sind. Dies und eine weiterführende detaillierte Zusammenfassung der Beteiligung des ANS anhand verschiedenster Messgrößen in multiplen emotionalen Zuständen findet sich im Review von Kreibitz (2010).

Aus der Vielzahl der messbaren Parameter für das ANS soll nun zusammenfassend noch weiter auf die in der vorliegenden Studie verwendeten kardiovaskulären Messgrößen eingegangen werden.

1.4.4.2 Puls Transit Zeit

Effekte des ANS auf das kardiovaskuläre System untersuchten schon Weiss et. al (1980) unter Zuhilfenahme der Herzrate und der Puls Transit Zeit (pulse transit time: PTT). Die PTT kann aus der Messung der Pulswellengeschwindigkeit (PWG) indirekt Aufschluss über die Höhe des Blutdruckes liefern. Hierdurch können in Untersuchungen blutige, kontinuierliche Messungen vermieden werden. Studien konnten einen Zusammenhang zwischen Blutdruckänderungen und der gemessenen PTT zeigen (Kounalakis & Geladas, 2009; Sharwood-Smith, Bruce, & Drummond, 2006; Smith, 1999). Die PTT ist als Zeitdauer definiert, welche die Pulswelle innerhalb einer Herzaktion zwischen zwei definierten arteriellen Punkten benötigt. Gemessen wird die PTT der Einfachheit halber als Zeit zwischen der im EKG abgeleiteten R-Zacke und dem peripher abgeleiteten Beginn der Pulswelle (Foo, Lim, & Wang, 2006; Hennig & Patzak, 2013). Die durch die diskontinuierliche Förderfähigkeit des Herzens erzeugte Geschwindigkeit der Pulswelle ist in erster Linie von der Elastizität bzw. der Steifigkeit der Blutgefäße, von der Blutviskosität sowie von der Kontraktionskraft und -geschwindigkeit des Herzens abhängig (Hennig & Patzak, 2013; Kounalakis & Geladas, 2009).

Zudem konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem sympatiktönen Muskeltonus und der PTT besteht (Świerblewska et al., 2010), hier also ein direkter Zusammenhang zwischen Aktivierung des ANS und PTT nachweisbar ist. Insgesamt kann die PTT als physiologische Größe gesehen werden, deren Änderungen sowohl mit der Aktivität des autonomen Nervensystems als auch mit Änderungen des Blutdruckes assoziiert ist.

1.4.4.3 Herzrate

Die Herzrate ist ein Parameter, der sich aus dem Abstand der R-Zacken voneinander leicht errechnen lässt ($HR [1/min] = 60/RR\text{-Abstand [s]}$). Sie gilt als einer der physiologischen Indikatoren für eine emotionale Valenz (E. M. Bernat et al., 2011). Bezogen auf die Beeinflussung der Herzrate spielt beim Betrachten von Bildern des IAPS deren Wertigkeit eine Rolle. Bei unangenehmen Affekten zeigt sich ein Abfall

der Frequenz über alle Bildinhalte aus dem gesamten unangenehmen Bildpool, ein Anstieg der Herzrate konnte einzig in besonders bedrohlichen Bildern mit einer ungewöhnlich hohen Aktivierung des defensiven Systems beobachtet werden (Bradley et al., 2001). Bei angenehmen Bildern zeigte sich ebenso ein leichter Frequenzabfall, erotische Stimuli zeigten verglichen mit bspw. Natur- oder Familienbildern eine deutlichere Beeinflussung der Herzrate (Bradley et al., 2001). Bei Bernat (2006) zeigt sich ein Frequenzabfall beim Vergleich der negativen Bilder mit den positiven, was ein weiterer Beleg für die Bedeutung der Wertigkeit und ihre Einflussnahme auf das die Herzrate beeinflussende autonome Nervensystem darstellt.

Nicht nur die Messung der vegetativen Parameter sondern auch zentrale, zerebrale und beispielsweise im EEG darstellbare Prozesse sind in der Erforschung der Emotionen von Relevanz. Auf diese soll im nächsten Abschnitt weiter eingegangen werden.

1.4.5 Emotion und Ereignis-korrelierte Potentiale

Wissenschaftliches Interesse an Emotionen und deren Verknüpfung mit Aufmerksamkeit besteht seit vielen Jahrzehnten. Ein Überblick über die wesentlichen Eckpunkte der Entwicklung dessen beginnend bei Pavlov findet sich bei Bradley (2009).

In Bildsystemen gilt das „Late Positive Potential“ (LPP; (Cacioppo, Crites, Gardner, & Bernston, 1994)), ein im EEG messbares Ereignis-korreliertes Potential, als kennzeichnend für die motivationale Relevanz der emotionalen Reize (Lang & Bradley, 2010). Das LPP zeigt eine Positivierung über centro-parietalen Elektroden beginnend ab ca. 300-400 ms nach Beginn der Reizpräsentation und kann bis zu 6 Sekunden andauern (Cuthbert et al., 2000; Sabatinelli, Lang, Keil, & Bradley, 2007). Die Amplitude des LPP zeigt ein größeres Ausmaß für angenehme und unangenehme Bilder verglichen mit denen bei Präsentation von neutralem Bildstimulusmaterial. Dies stimmt mit dem Gedanken überein, dass das LPP nicht mit der Wertigkeit der Emotion in direkter Verbindung steht, sondern dass sich hierin die

Intensität der affektiven Beteiligung des motivationalen Systems widerspiegelt (Schupp, Junghofer, Weike, & Hamm, 2003). Die größten Amplituden finden sich bei Bildern mit erotischen Inhalten oder Verstümmelungen (Weinberg & Hajcak, 2010).

Die initialen Gedanken, dass es sich hierbei um einen primär mit Aufmerksamkeitsleistungen assoziierten Prozess handelt, wurde von Codispoti, Ferrari und Bradley (2006, 2007) als unzureichende Erklärung angesehen. Die Autoren zeigten in ihrer Versuchsanordnung ein Bild bis zu 60 bzw. 90 Mal innerhalb einer Sitzung, bei leichter Abschwächung der Amplitude blieb die emotionale Beeinflussbarkeit des LPP aber bis zuletzt erhalten, es stellte sich kein nennenswerter Gewöhnungseffekt ein. Auch nur sehr kurz gezeigte Bilder, für 25 ms, lösen ein Emotions-assoziertes LPP aus und weisen ein mit länger gezeigten Bildern, bis zu 6s, vergleichbares emotionales Reaktionsmuster auf (Codispoti, Mazzetti, & Bradley, 2009).

So wird davon ausgegangen, dass das LPP als EP-Element Ausdruck einer Zunahme der Aufmerksamkeit für Motivations-relevante emotionale Stimuli ist (Bradley, 2009). Emotionale Bilder mit zunehmenden Grad an beinhaltetem Arousal ziehen also mehr Aufmerksamkeit auf sich.

1.4.6 Emotionswahrnehmung und neuronale Korrelate in der Bildgebung

Breites Interesse richtet sich auch auf die Verknüpfung von physiologischen, autonomen Körperreaktionen bei Emotionen mit entsprechenden zerebralen bildgebenden Studien, Verwendung finden die Positionsemissionstomographie (PET) und auch zunehmend die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT). Diese zeigen verschiedene Beteiligungen von Gehirnarealen je emotionalem Zustand (Lane et al., 1997; Lang & Bradley, 2010; Sabatinelli, Bradley, Lang, Costa, & Versace, 2007). Für die nun im folgenden genannten anatomischen Strukturen wird die bilaterale Aktivierung dieser vorausgesetzt, sofern dies für die jeweiligen Strukturen zutreffend oder nicht anders gekennzeichnet ist, und nicht immerfort neu erwähnt.

Schon Lane et al. (1997) beschreiben in ihrer PET-Untersuchung eine für positive und negative Emotionen betreffenden spezifischer Beteiligung von Gehirnarealen. Es

ist davon auszugehen, dass die durch das Betrachten von Bildern hervorgerufene emotionale Reaktionen durch neuronalen Schleifen und Korrelate der motivationalen Achsen so widergespiegelt und erkenntlich werden (Lang et al., 1998a).

Bei angenehmen Reizen findet sich über verschiedene Untersuchungen hinweg ein ähnliches Ergebnis, eine Aktivität in der Amygdala, des Ncl. accumbens und des ventralen medialen präfrontalen Kortex (Costa, Lang, Sabatinelli, Versace, & Bradley, 2010; Sabatinelli, Bradley, et al., 2007). Dem Ncl. accumbens wird eine zentrale Bedeutung im Belohnungssystem mit vielschichtiger Bedeutung zugeschrieben (Pecina, 2008). Der präfrontale Kortex wird als eine Gehirnregion verstanden, die in der Regulation unserer Gedanken, Handlungen und Emotionen in vielfältigster Weise über multiple innercerebrale Verknüpfungen beteiligt ist. Der ventrale mediale Kortex weist beträchtliche Verbindungen zu Amygdala, Ncl. accumbens und Hypothalamus, also subcortikalen Strukturen, auf und beeinflusst somit emotionale Reaktionen und Gewohnheiten mit (Arnsten, 2009).

Unangenehme Stimuli lösen eine Aktivierung der Amygdala und der periaquäduktalen grauen Substanz (PAG) aus (Hermans et al., 2013). Es fand sich eine Aktivitätszunahme in der Amygdala-PAG-Bahnung, welche mit einer überwiegend parasympathischen Antwort, charakteristisch für das durch Angst ausgelöste Freezing, assoziiert ist. Zudem zeigte sich ein Zusammenhang zwischen Abfall der Herzrate und Aktivität des PAG bei der Exposition gegenüber negativen Bildern. Eine Aktivierung des Ncl. accumbens sowie des ventralen medialen Präfrontalkortex findet sich nicht.

Die oben erwähnte Aktivitätszunahme der Amygdala sowohl bei angenehmen als auch bei unangenehmen Reizen wird von den Autoren in Zusammenhang mit einer Zunahme des Arousals gesehen (Sabatinelli, Bradley, Fitzsimmons, & Lang, 2005).

Insgesamt wird die Erforschung der Zusammenhänge emotionaler Zustände und beteiligter kortikaler Strukturen mit deren Funktionen auch in Zukunft auf breites Interesse stoßen und ist bei weitem noch nicht abgeschlossen.

Emotionen und deren Erforschung stellen ein facettenreiches Feld mit noch vielen offenen Fragen dar. Das IAPS ist ein Testsystem, das sich einfach verwenden lässt

um Emotionen in Versuchssituationen zu induzieren. Hierfür sind einhergehende physiologische Begleitreaktionen gut untersucht. Studien, die eine Verbindung mit im EEG messbaren Parametern genutzt haben, beschäftigten sich überwiegend mit dem LPP und Aufmerksamkeitsprozessen.

Im ersten Teil der Einleitung wurde die MMN eingeführt, in der akustischen Modalität Paradebeispiel einer die präattentive Reizdiskrimination symbolisierende, u.a. im EEG aufzeichnen- und messbare, Größe. Die MMN wird den ERPs zugeordnet, elektroencephalographisch Ausdruck kognitiver Prozesse. Im sich daran anschließenden Kapitel der Einleitung lag der Fokus auf Emotionen, welche, ausgedrückt in Wertigkeit und Erregungslevel, auch als Zustände zu verstehen sind, die kognitive Prozesse und Ressourcen benötigen und nicht zuletzt Aufmerksamkeit binden. Die assoziierten physiologischen Reaktionen lassen Rückschlüsse auf das einhergehende Erregungsausmaß zu.

Diese zwei Grundkonzepte und -ideen sollen im vorliegenden Versuchsaufbau in Beziehung zueinander gesetzt werden, um im weitesten Sinne der Frage nach Art, Funktionsweise und Beeinflussungsmöglichkeiten der Reizdiskrimination im Kontext von Aufmerksamkeit und Bewusstsein etwas näher zu kommen. Fragestellung und Zielsetzung soll Inhalt des nächsten Kapitels sein.

1.5 Herleitung der Untersuchungshypothesen

Sowohl akustische als auch emotionale Prozesse benötigen kognitive Kapazitäten. Untersuchungen zur Wechselwirkung emotionaler Bilder auf die präattentive akustische Reizdiskriminierung, verbildlicht in der MMN, ergaben divergente Ergebnisse. In den folgenden zwei Studien wurde jeweils das IAPS als bildlicher emotionaler Induktor verwendet. Die Autorengruppe um Surakka (1998) konnten eine Abnahme der Größe der MMN während der Präsentation von positiven Bildern messen und schlussfolgerten, dass eine akustische vorbewusste Reizdiskriminierung in wenig erregenden, angenehmen emotionalen Zuständen nicht so erforderlich sei.

Zu einem gegensätzlichen Ergebnis kamen die Autoren Mardaga und Hansenne (2009), die eine größere MMN in bildlich angenehmen Kontexten maßen, jedoch bei einem des positiv konnotierten Bildmaterials inhärenten höheren Erregungsniveau. Insgesamt kann die Frage gestellt werden, ob und wie die verschiedenen kognitiven Prozesse der Emotionen sowie die der akustischen Reizdiskriminierung einander beeinflussen. Wenn nun der emotionale Zustand entweder übermäßig Ressourcen benötigt oder aber inhibierend mit der präattentiven Reizdiskriminierung interagiert, könnte eine reduzierte MMN angenommen werden. Gleichwohl besteht die Möglichkeit, dass die jeweilige Emotion i.S. einer insgesamt Zunahme der Aufmerksamkeit und/oder des Erregungslevels zu einer Verstärkung der vorbewussten Aufmerksamkeit führt, was sich in einer vergrößerten MMN niederschlagen würde.

In dieser Studie soll nun mittels den Bildern des IAPS eine emotional „neutrale“, „angenehme“ sowie eine „unangenehme“ Untersuchungsbedingung hergestellt werden. Gleichzeitig soll über ein akustisches Zwei-Ton-Paradigma eine MMN generiert und abgeleitet werden. Zeitgleich erfolgt die Messung vegetativer Parameter, es werden die Größen Herzrate und Puls Transit Zeit verwandt, um den korrelierenden Erregungszustand des Probanden genauer zu klassifizieren.

Damit soll untersucht werden, ob und in wieweit die Größe der MMN im Zusammenhang mit den Valenzen und dem Arousal der den Probanden gezeigten Bildern steht und ob es zwischen den nach emotionaler Wertigkeit geordneten Bildblöcken Unterschiede in der MMN-Amplitude gibt. Um den Zusammenhang mit dem Arousal besser zu untersuchen soll analysiert werden, ob und in welchem Ausmaß die Größe der MMN mit dem gemessenen vegetativen Zustand in Verbindung steht. Es kann auf Grundlage der angeführten Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass sich eine Vergrößerung der Fläche unter der Kurve der MMN in den Untersuchungsbedingungen „angenehm“ und „unangenehm“ als Ausdruck der höheren psychovegetativen Erregung, bestätigt in den kardiovaskulären Messparametern, ergibt.

2 Methodik

2.1 Probanden

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt 27 freiwillige Versuchspersonen (10 männlich, 17 weiblich) untersucht. Das mittlere Alter lag bei 26,04 Jahren (Standardabweichung 2,38, Median 25 Jahre), die Altersspanne war zwischen 23 und 33 Jahren. Sechs Untersuchungen mussten aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden, da die EEG-Registrierungen zu artefaktbehaftet (Augenbewegungen, Blinks, Bewegungen, muskuläre Anspannung) waren, und daher für die weitere Analyse nicht geeignet waren.

Alle Versuchspersonen hatten die allgemeine Hochschulreife und befanden sich entweder in einem Studium oder hatten dieses bereits abgeschlossen. In die Messungen aufgenommen wurden nur gesunde Probanden mit normal guter oder dahingehend korrigierter Sehstärke, mit ausreichendem Hörvermögen und ohne psychiatrische oder neurologische Vorerkrankungen. Ebenso wurden nur solche ohne vorhergehenden Medikamenten-, Alkohol- oder Drogengebrauch einbezogen. Die Einbestellung der Versuchspersonen zu der Untersuchung erfolgte jeweils in der zweiten Tageshälfte im Zeitraum zwischen 14 und 21 Uhr.

Nach ausführlicher Aufklärung über den Inhalt und die Art der Durchführung der Untersuchung, zu der die Probanden nach dem im Votum der Ethikkommission festgelegten Vorgehen ihr schriftliches Einverständnis gegeben hatten, erfolgte die EEG-Registrierung mit paralleler visueller und akustischer Stimulation zur Ermittlung der MMN sowie der weiteren vegetativen Parameter. Es erfolgte keine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme.

2.2 Untersuchungsbedingungen und Ablauf der Untersuchung

Die Probanden wurden allesamt in einem Zeitraum zwischen 14 und 21 Uhr untersucht. Das Bildmaterial des IAPS wurde mit dem Programm „Microsoft Power Point“ über einen handelsüblichen 17“-PC-Monitor, der in ca. 1,5 Metern Abstand zum jeweiligen Probanden positioniert war, dargeboten. Jedes der insgesamt 60

Bilder wurde in festgesetzter Reihenfolge über einen Zeitraum von 3 Sekunden gezeigt, es wurde mit den neutral-indifferenten Bildern begonnen, gefolgt von den angenehmen Bildern und abschließend der Block mit den unangenehmen Bildern. Dieser Ablauf wurde wiederholt, so dass insgesamt sechs Bildblöcke à 60 Sekunden aufgezeichnet werden konnten, neutral – angenehm – unangenehm – neutral – angenehm – unangenehm. Begonnen wurde mit einem schwarzen Bildschirm mit zentralem, türkisen Fixierungskreuz, alle weiteren Bilder waren mit einem umgebenden schwarzen Rand von 2,5 cm versehen. Um sicherzustellen, dass der Proband die ihm gezeigten Bilder fokussierte und sich hierauf konzentrierte, war der Stimuluspräsentation ein Slide vorgeschaltet, das darauf hinwies, dass der Proband nach der Messung über seine Gefühle befragt werden würde. Der Proband saß auf einem mit Armlehnen versehenen Schreibtischstuhl in einer bequemen Sitzhaltung mit Blick frontal auf den in Augenhöhe stehenden Bildschirm. Mögliche Außenreize wurden minimiert, so war das Licht ausgeschaltet, die Jalousien herunter gelassen und die Türen verschlossen, weiter waren keine Personen abgesehen von dem Probanden und der Versuchsleiterin im Raum anwesend. Der Proband erhielt einen rechten und einen linken „in-ear“-Kopfhörer für die akustische Reizdarbietung, welche mit der Soundkarte des die auditiven Stimuli präsentierenden Computers verbunden war. Die Lautstärke der Töne lag stetig bei 60 dB SPL, das onset-to-onset Intervall lag bei 1,5 s, die einzelnen Töne wiesen eine Dauer von 150 ms auf.

Nach einer Begrüßung durch die Versuchsleiterin wurden den Probanden in entspannter Atmosphäre die Messmethoden erklärt, ohne jedoch auf das eigentliche Ziel der Untersuchung hinzuweisen. Nach erfolgter Einverständniserklärung wurde mit den Probanden vereinbart, dass sie keinen Außenstehenden über den genaueren Ablauf der Messungen bis zum Abschluss der Arbeit informieren würden, um Unvoreingenommenheit weiterer ihnen möglicherweise bekannter Probanden zu gewährleisten. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, auf die präsentierten Bilder zu achten und die akustischen Reize zu ignorieren. Diese Information wurde durch die beschriebene vorgeschaltete Folie zum Beginn des Versuches erneut wiederholt.

Außerdem wurden die Versuchspersonen angewiesen sich in komfortabler Weise auf den Stuhl zu setzen, sich so ruhig wie möglich zu halten und mittig, mit möglichst minimalem Blinzeln auf den Bildschirm zu schauen.

Nach Anbringen der wie in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Elektroden wurde nach erfolgter Impedanzprüfung und ggf. nochmaliger Verbesserung der Elektroden mit der Präsentation des Bildmaterials begonnen. In der EEG-Aufzeichnung wurden die Wechsel zwischen den emotionalen Valenzen der Bilder jeweils mit einem Marker gekennzeichnet. Es erfolgten zwei direkt aufeinander folgende Messungen. Danach wurde den Probanden je Wunsch und Interesse der Hintergrund der Messungen erklärt.

2.3 MMN-Untersuchung

2.3.1 EEG-Registrierung

Zur Registrierung des EEG wurden Elektroden in den Positionen Fz, Cz, Pz, A1 und A2 des internationalen 10/20-Systems auf dem Kopf der Probanden positioniert. Zusätzlich dazu wurden rechts und links der Elektrode Cz eine Referenz- und eine Erdungselektrode mittels Gummizughaube fixiert. Durch Reinigung der Kontaktstellen mittels einer EEG-Reinigungspaste und eines gebräuchlichen Hautdesinfektionsmittels wurden die Überleitwiderstände so optimiert, dass diese unter 5 Ohm lagen. Zur Identifizierung entsprechender Artefakte im EEG (EKG-Artefakte, Artefakte durch Augen- und/oder Lidbewegungen) erfolgte eine parallele Mit-Registrierung des Elektrokardiogramms (EKG) (genauere Beschreibung siehe im Kapitel „2.4 Vegetative Parameter“) und des horizontalen sowie des vertikalen Elektrookulogramms mittels handelsüblicher Klebeelektroden.

Das verwendete Programm bzw. System zur Aufzeichnung des EEG und der EKG- sowie EOG-Signale war das EEG-System NeurofileXP der Firma Natus GmbH (<https://natus.com>).

Zu Zwecken der Dokumentation und um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten wurden, wie oben erwähnt, zwei innerhalb der gleichen Sitzung aufeinander folgende Messungen durchgeführt.

2.3.2 Akustische Stimulation

Parallel zur EEG-Aufzeichnung und zur wie oben beschriebenen visuellen Stimulation mit den Bildern des IAPS wurden den Probanden über Kopfhörer eine Folge von häufigen Standardreizen (Sinuston 1500 Hz, 150 ms Dauer, Auftretenshäufigkeit 80%) und zufällig eingestreuten, seltenen Deviants (2000 Hz, 150 ms Dauer, Auftretenshäufigkeit 20%) dargeboten. Die Tonintensität war für beide Stimuli mit 60 dB SPL gleich und das onset-to-onset-Intervall betrug immer 1,5 Sekunden.

Die Reizgenerierung und Reizdarbietung erfolgte mit der Software „Presentation“ der Firma Neurobehavioral Systems (www.neurobs.com) über einen dafür u.a. mit einer speziellen Soundkarte optimierten separaten PC.

Es erfolgte vorab keine Information über die unterschiedlichen Reizklassen der akustischen Stimuli. Die Probanden wurden vor Beginn der Untersuchung lediglich über das Material der visuellen Stimulation informiert. Aus dem simultan aufgezeichneten EEG wurden reizklassengetrennt stimulussynchrone Segmente gemittelt und die MMN daraus berechnet.

2.3.3 Analyse der EEG-Daten und Bestimmung der MMN

Zur weiteren Verarbeitung der EEG-Daten erfolgte ein Import der Daten in das EEG-Analyse-Programm *Vision-Analyser* der Fa. Brain Products (www.brainproducts.com).

Zunächst erfolgte eine visuelle Inanschaunahme des Roh-EEG hinsichtlich der Artefaktbeladung durch Augenbewegungen und Blinkartefakte, muskulärer Anspannung sowie Bewegungen der Probanden. Danach erfolgte eine Neu-Referenzierung der Roh-EEG-Daten zu einer gemeinsamen Referenz mit verbundenen Mastoidelektroden (A1 und A2). Es erfolgte dann eine Korrektur der

EEG-Daten auf Augenbewegungen. Mittels eines Segmentierungsvorganges erfolgte dann die Zuordnung der stimulussynchronen EEG-Segmente in die Bedingungen Standard- und Zielreiz (Deviant), die dann nach dem Ausschluss artefaktbehafteter Segmente reizklassengetrennt zu einem evozierten Potential gemittelt wurden. Aus dem dann ermittelten Differenzpotential (Deviant minus Standard) erfolgte dann die Berechnung der Mismatch Negativität als Fläche unter der Differenzkurve bezogen zur Nulllinie (in Bezug auf das Prästimulusintervall) in einem Zeitfenster zwischen 50 und 300 ms. In die Auswertung ging die so ermittelte MMN der Elektrodenposition Cz/A1A2 ein. Die Analyse erfolgte, wie oben angegeben, mit der Software „visionanalyser“ der FA. Brain Products. Diese Auswerteprozedur wurde jeweils für die Bedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ der zeitgleichen visuellen Stimulation mit dem Bildmaterial des IAPS vorgenommen.

2.4 Vegetative Parameter

2.4.1 Herzrate

Die Herzrate wurde aus dem während der Untersuchung mit aufgezeichnetem EKG errechnet. Hierbei wurde der Abstand der R-Zacken voneinander ausgemessen und dies durch 60 dividiert, es ergibt sich die Frequenz pro Minute. ($HR [1/min] = 60/RR\text{-Abstand [s]}$). Dies erfolgte mittels einer automatischen R-Zacken-Erkennung von Herzschlag zu Herzschlag („beat to beat“). Die so ermittelten Werte wurden in eine ASCII-Datei konvertiert, exportiert und mit dem wie in Kapitel 2.6 beschriebenen eingesetzten Statistikprogramm weiterverarbeitet.

2.4.2 Pulstransitzeit

Die Messung der PTT erfolgte über das EKG sowie der am rechten Zeigefinger angebrachten Photoplethysmographiesonde. Die PTT stellt die zeitliche Dauer zwischen der im EKG abgeleiteten R-zacke und dem Eintreffen der Pulswelle an der Sonde dar, s. hierzu auch Kap. 1.4.4.2. Die so ermittelten Werte wurden in eine ASCII-Datei konvertiert, exportiert und mit dem eingesetzten Statistikprogramm (s. Kap. 2.6) weiterverarbeitet.

2.5 Visuelle Stimulation

Das visuelle Stimulationsmaterial bestand aus insgesamt 60 farbigen Bildern aus dem International Affective Picture System (IAPS, s. Punkt 1.2.2). Die Bilder wurden in drei Blöcke à 20 Bilder entsprechend der emotionalen Wertigkeit, in neutral („neutral-indifferent“), angenehm („pleasant“) und unangenehm („unpleasant“), aufgeteilt. Als Reihenfolge der Präsentation der Bildblöcke wurde neutral - angenehm - unangenehm gewählt, die Reihenfolge der einzelnen Bilder innerhalb der Bildblöcke war für alle Untersuchungen gleich. Folgende IAPS Bildnummern wurden verwendet: „neutral“: 2191, 2214, 2215, 2372, 2383, 2393, 2394, 2480, 2595, 7550, 5740, 7036, 7041, 7050, 7100, 7130, 7161, 7224, 7234, 7500; „angenehm“: 4611, 4641, 4658, 4659, 4666, 4676, 4677, 4680, 4681, 4690, 1440, 1460, 1463, 1530, 1540, 1590, 1610, 1710, 1750, 1920; „unangenehm“: 1010, 1019, 1050, 1052, 1090, 1110, 1111, 1113, 1114, 1120, 3000, 3051, 3060, 3068, 3069, 3071, 3100, 3101, 3266, 3400. Neutrale waren solche Bilder die Alltagsszenen, Autos, Haushaltsgegenstände oder indifferenten Personen zeigten, angenehme Bilder waren solche mit Tierbabys bis hin zu erotischen Abbildungen. Auf den unangenehmen Bildern waren beispielsweise Schlangen oder Verletzungen bis hin zu Verletzungsabbildungen von Menschen, z.T. mit amputierten Körperteilen, zu sehen. Die genannte Auswahl des in dieser Arbeit verwendeten IAPS-Bildmaterials war an die Untersuchung von Sabatinelli, Lang et al. (2007) angelehnt. In deren Studie war für die verwendeten IAPS-Bilder u.a. die emotionale Intensität über die Änderung des LPP bestätigt worden, zudem waren die Bilder in ihren jeweiligen Kategorien hinsichtlich Helligkeit und Kontrast ausgeglichen.

2.6 Statistische Auswertung

In die statistische Auswertung wurden die MMN (Fläche unter der Kurve, $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$), die Puls Transit Zeit, die Herzrate einbezogen. Die statistische Berechnung erfolgte mit der Software SPSS-22 der Fa. IBM SPSS Software (www.ibm.com).

Bei nicht-normalverteilten Daten und dem statistischen Vergleich von drei anhängigen Stichproben („neutral“, „angenehm“, „unangenehm“) erfolgte der Gruppenvergleich mit dem Friedman-Test. Bei statistischer Signifikanz erfolgte eine post-hoc Analyse der einzelnen Untersuchungsbedingungen untereinander mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test. Eine statistische Signifikanz ist bei einem p-Wert $\leq 0,5$ (*) gegeben.

Neben dem Gruppenvergleich der Variablen MMN, HR und PTT für die drei Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ wurde untersucht, ob es entsprechend den in Kap. 1.5 dargelegten Hypothesen eine signifikante Korrelation zwischen den Variablen MMN und HR sowie MMN und PTT in den jeweiligen Untersuchungsbedingungen gibt. Dazu wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson (r), die statistische Signifikanz (p), die Regressionsgrade ($y=ax+b$) sowie das Bestimmtheitsmaß (R^2) berechnet. Die Ergebnisse wurden tabellarisch, in Boxplot-Diagrammen sowie Regressionsgraden dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1. Datenbeschreibung

Einbezogen in die Auswertung wurden nach Ausschluss von 6 Untersuchungen (s. Kap. 2.1) 21 Probanden. Eine Darstellung der statistischen Kennwerte der untersuchten Variablen MMN, HR und PTT findet sich in der sich anschließenden Tabelle 1.

	Alter [Jahre]	Mismatch Negativity (MMN) [$\mu\text{V}\cdot\text{ms}$]	Herzrate (HR) [bpm]	Puls Transit Zeit (PTT) [ms]
Gesamtzahl	n = 21	n = 21	n = 21	n = 21
MW	26,3			
SD	2,72			
Min-Max	23 - 33			
Untersuchungsbedingung „neutral“				
MW		910,09	73,48	200,1
MD		870,85	86	198
SD		313,92	11,87	17,09
Min-Max		356,79 - 1472	57 - 97	175 - 236
Untersuchungsbedingung „angenehm“				
MW		867,02	70,48	201,76
MD		786,21	68	200
SD		319,64	9,85	18,15
Min-Max		572,32 - 1705,43	59 - 96	174 - 239
Untersuchungsbedingung „unangenehm“				
MW		963,33	70,95	202,52
MD		967,61	70	200
SD		329,27	9,69	18,12
Min-Max		444,19 - 1640,92	59 - 97	173 - 243

Tabelle 1: statistische Kennwerte (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Min-Max) der Variablen MMN, HR und PTT für die Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“

Die nach Messgrößen geordneten Datenbeschreibungen folgen in den sich anschließenden Unterkapiteln, ergänzend werden die jeweiligen Variablen in sog. Boxplots dargestellt. Eine genaue Interpretation dieser ist nachzulesen unter <https://novostat.com/statistik-blog/spss-boxplot-interpretieren.html>.

3.1.1 Mismatch Negativity

Die Mismatch Negativity (MMN), ermittelt als Fläche unter der Differenzkurve des Deviants minus des Standards, lag für die neutrale Untersuchungsbedingung im Mittel bei 910,09 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$ (SD +/- 313,92). Das Minimum und Maximum konnten bei 356,79 bzw. bei 1472 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$ verzeichnet werden, der Median lag bei 870,85. Für die Untersuchungsbedingungen mit den angenehmen visuellen Reizen lag die MMN im Mittel bei 867,02 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$ (SD +/- 319,64), das Minimum lag bei 572,32 und das Maximum bei 1705,43 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$, der Median bei 786,21 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$. Für die unangenehmen Untersuchungsbedingung ergab sich ein Mittelwert von 963,33 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$ (SD +/- 329,27), ein Minimum bzw. Maximum von 444,19 bzw. 1640,92 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$ und der Median lag bei 967,61 $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$.

In der folgenden Darstellung findet sich die ermittelte Fläche der MMN entsprechend den drei Untersuchungsbedingungen in Boxplots wiedergegeben.

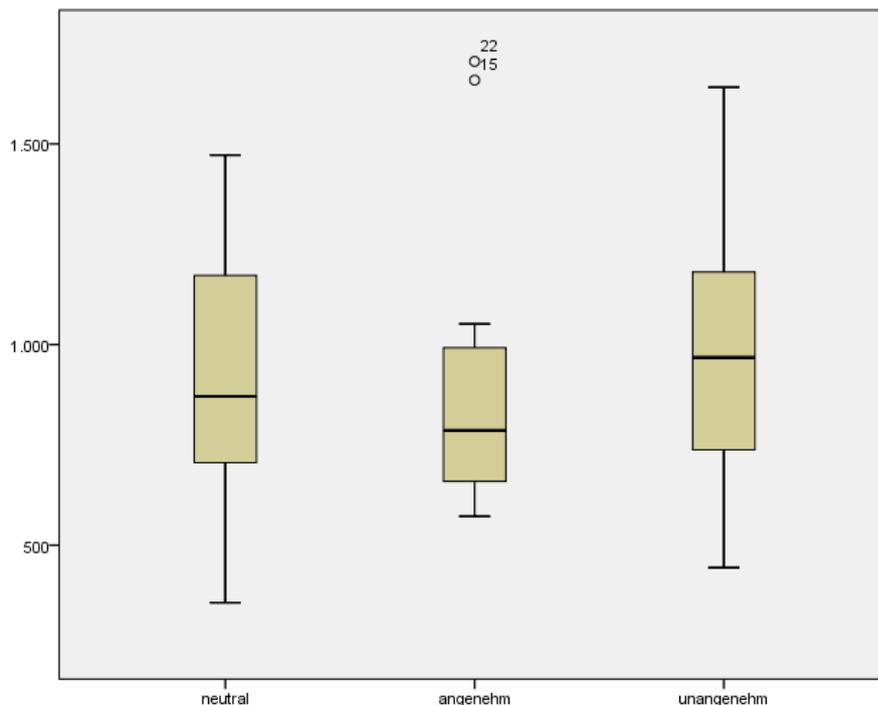


Abbildung 2: Flächen der MMN für die drei Untersuchungsbedingungen [AUC, $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$]

3.1.2 Herzrate

Die Herzrate, ermittelt aus dem EKG als Schläge pro Minute (beats per minute, bpm), lag für die neutrale Untersuchungsbedingung im Mittel bei 73,48 bpm (SD +/- 11,87), Minimal und Maximalwert lagen bei 57 bzw. 97 bpm, der Median bei 68. Für die angenehme Untersuchungsbedingung lag der Mittelwert bei 70,48 bpm (SD +/- 9,85), das Minimum bei 59 und das Maximum bei 96 bpm, der Median lag bei 68. Für die unangenehme Bedingung lag der Mittelwert bei 70,95 bpm (SD +/- 9,69), das Minimum und Maximum bei 59 bzw. bei 97 bpm, der Median war bei 70.

In der folgenden Darstellung findet sich die ermittelte Herzrate [bpm] entsprechend den drei Untersuchungsbedingungen in Boxplots wiedergegeben.

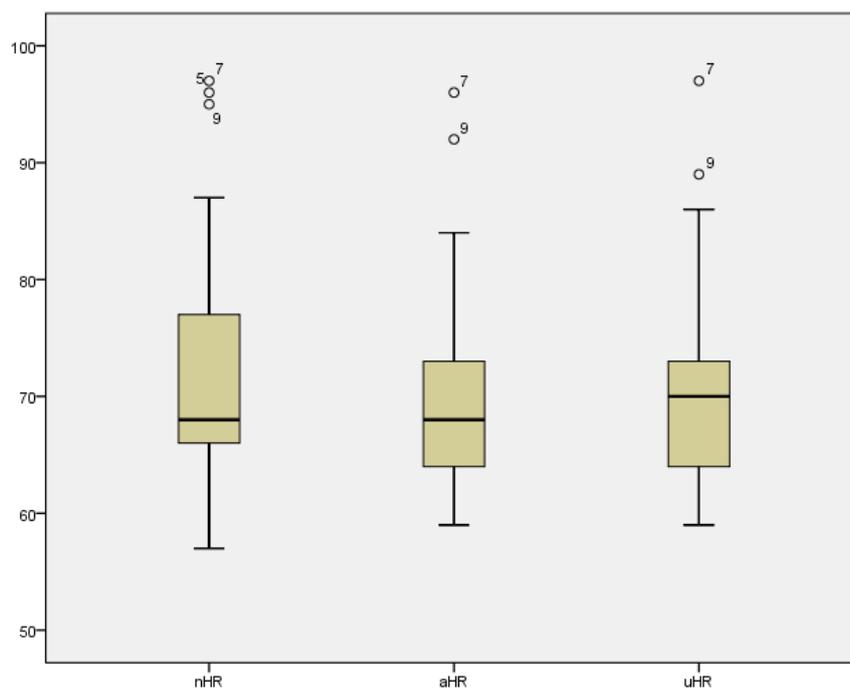


Abbildung 3: Herzrate (HR) für die drei Untersuchungsbedingungen [bpm]

3.1.3 Puls Transit Zeit

Die Pulstransitzeit, gemessen als zeitliche Dauer zwischen der im EKG abgeleiteten R-Zacke und dem peripher abgeleiteten Beginn der Pulswelle, lag für die neutrale Untersuchungsbedingung im Mittel bei 200,1 ms (SD +/- 17,09), Minimal- und

Maximalwert lagen bei 175 bzw. 236 ms, der Median lag bei 198 ms. Für die angenehme Untersuchungsbedingung lag der Mittelwert bei 201,67 ms (SD +/- 18,15), Minimal- und Maximalwert lagen bei 174 bzw. 239 ms, der Median lag bei 200 ms. Für die unangenehme Untersuchungsbedingung lag der Mittelwert bei 202,52 ms (SD +/- 18,14), Minimal- und Maximalwert lagen bei 173 bzw. 243 ms, der Median lag bei 200 ms.

In der folgenden Darstellung findet sich die ermittelte Puls Transit Zeit [ms] entsprechend den drei Untersuchungsbedingungen in Boxplots wiedergegeben.

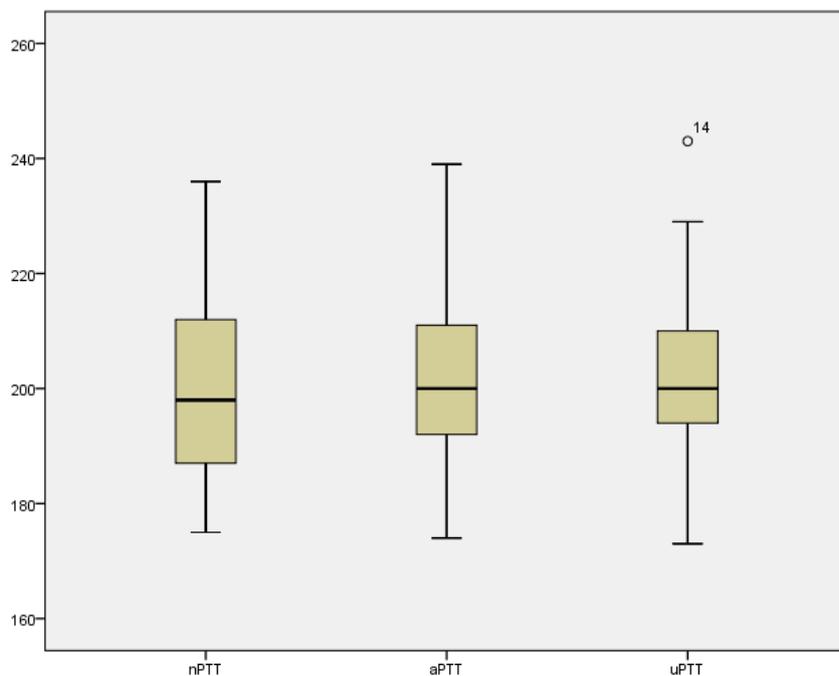


Abbildung 4: Puls Transit Zeit für die drei Untersuchungsbedingungen [ms]

3.2 Statistischer Vergleich der verschiedenen Untersuchungsbedingungen

In Tabelle 2 (s.u.) werden die zuvor erläuterten Kennwerte ergänzt durch die statistischen Gruppenvergleiche.

	Alter [Jahre]	Mismatch Negativity (MMN) [$\mu V \cdot ms$]	Herzrate (HR) [bpm]	Puls Transit Zeit (PTT) [ms]
Gesamtzahl	n = 21	n = 21	n = 21	n = 21
MW SD Min-Max	26,3 2,72 23 - 33			
Untersuchungsbedingung „neutral“				
MW MD SD Min-Max		910,09 870,85 313,92 356,79 - 1472	73,48 86 11,87 57 - 97	200,1 198 17,09 175 - 236
Untersuchungsbedingung „angenehm“				
MW MD SD Min-Max		867,02 786,21 319,64 572,32 - 1705,43	70,48 68 9,85 59 - 96	201,76 200 18,15 174 - 239
Untersuchungsbedingung „unangenehm“				
MW MD SD Min-Max		963,33 967,61 329,27 444,19 - 1640,92	70,95 70 9,69 59 - 97	202,52 200 18,12 173 - 243
Gruppenvergleiche				
Friedmann-Test Chi-Quadrat (Chi²) p-Wert		2,5 0,287	9,579 0,008	7,342 0,025
post-hoc-Analyse mit Wilcoxon-Vorzeichen- Rangtest: p-Wert -neutral vs. angenehm -neutral vs. unangenehm -angenehm vs. unangenehm			0,003 (**) 0,05(*) 0,504	0,07 0,023(*) 0,123

Tabelle 2: statistische Kennwerte (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Min-Max) der Variablen MMN, HR und PTT sowie statistischer Gruppenvergleich

Die Daten werden in den folgenden Unterkapiteln genauer erläutert.

3.2.1 Mismatch Negativity

Die quantitative Auswertung der Fläche der MMN und die statistische Analyse mit dem Chi-Quadrat-Test der drei Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ ergab keinen signifikanten Unterschied ($\chi^2 = 2,5$; $p = 0,287$). Eine post hoc-Analyse der einzelnen Untersuchungsbedingungen untereinander mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ist daher nicht sinnvoll.

3.2.2 Herzrate

Die Herzraten der einzelnen Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ unterscheiden sich signifikant ($\chi^2 = 9,579$; $p = 0,008$).

Eine post hoc-Analyse der einzelnen Untersuchungsbedingungen untereinander mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ergab ein Signifikanz-Niveau von 0,003 des Vergleichs der neutralen versus der angenehmen Untersuchungsbedingung, einen p-Wert von 0,05 im Vergleich der neutralen versus der unangenehmen Untersuchungsbedingung und einen p-Wert von 0,504 im Vergleich der angenehmen versus der unangenehmen Untersuchungsbedingung. Es besteht somit ein signifikanter Unterschied der Herzrate zwischen den Untersuchungsbedingungen „neutral“ und „angenehm“ sowie den Untersuchungsbedingungen „neutral“ und „unangenehm“.

2.3.2 Puls Transit Zeit

Die Puls Transit Zeiten der einzelnen Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ unterscheiden sich signifikant. Sie steigen von der neutralen Untersuchungsbedingung über die angenehme bis zu der unangenehmen Untersuchungsbedingung hin im Mittel an ($\chi^2 = 7,342$; $p = 0,025$). Eine post hoc-Analyse der einzelnen Untersuchungsbedingungen untereinander mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ergab ein Signifikanz-Niveau von 0,07 des Vergleichs der neutralen versus der angenehmen Untersuchungsbedingung, einen p-Wert von 0,0023 im Vergleich der neutralen versus der unangenehmen Untersuchungsbedingung und einen p-Wert von 0,123 im Vergleich der angenehmen versus der unangenehmen Untersuchungsbedingung. Es besteht somit ein signifikanter

Unterschied der Puls Transit Zeit im Vergleich zwischen den Untersuchungsbedingungen „neutral“ und „unangenehm“.

3.3 Wertekorrelationen

3.3.1 Wertekorrelationen von Mismatch Negativity und Herzrate

Die Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalysen von MMN und HR für die jeweiligen Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“.

		„neutral“	„angenehm“	„unangenehm“
Korrelationskoeffizient nach Pearson	r	0,608	-0,051	0,168
	p	0,004 (*)	0,826	0,466
Regressionsgrade		$y=0,0212x+53,021$	$y=-0,0014x+71,715$	$y=0,0043x+66,628$
Bestimmtheitsmaß	R²	0,3694	0,0026	0,0283

Tabelle 3: Korrelationsanalyse MMN und HR

3.3.1.1 Untersuchungsbedingung „neutral“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von 0,608 von einer geringen bis mittleren Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von 0,004 statistisch signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der hohe Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse (0,3694) belegt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable in mittlerem Maße (ca. zu 40 Prozent) durch die unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von Variable a vollständig - zu 100 Prozent - durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 5 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschauung legt nahe, dass ein linearer Zusammenhang besteht.

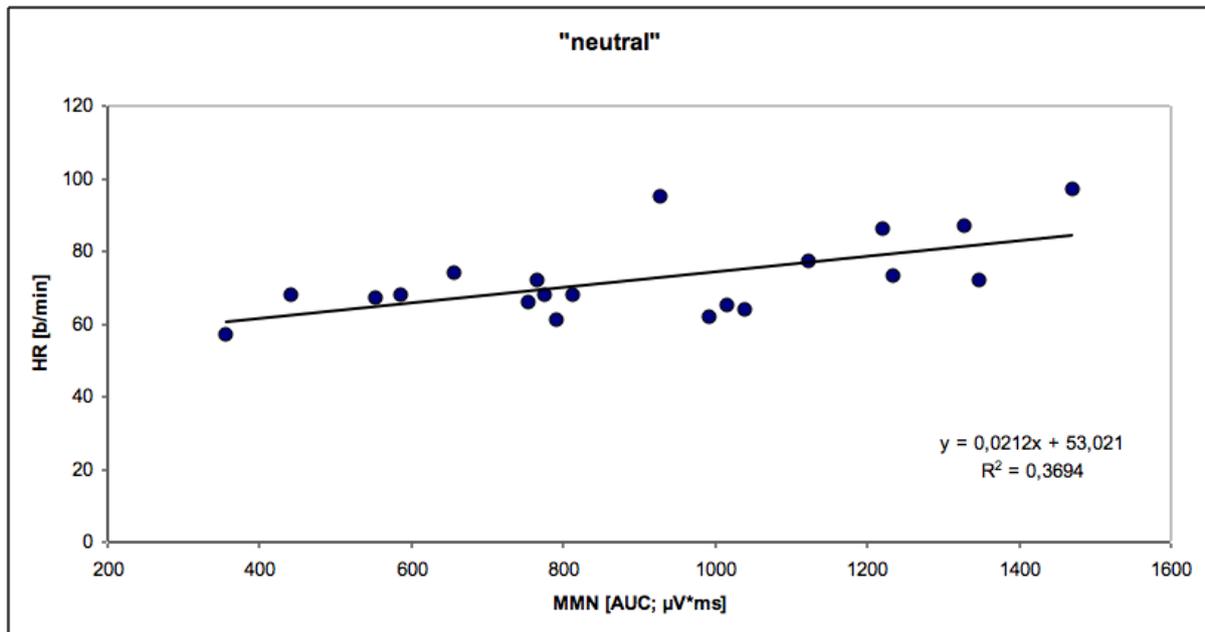


Abbildung 5: Korrelationsmatrix von MMN und HR in der neutralen Bedingung

3.3.1.2 Untersuchungsbedingung „angenehm“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von $-0,051$ von einer sehr geringen Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von $0,826$ statistisch nicht signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der niedrige Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse ($0,0026$) zeigt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable nur geringfügigst (ca. zu $0,2$ Prozent) durch die unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von Variable a vollständig - zu 100 Prozent - durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 6 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschauung legt nahe, dass offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht und ein Eintrag der Regressionsgeraden daher eher zweifelhaft erscheint.

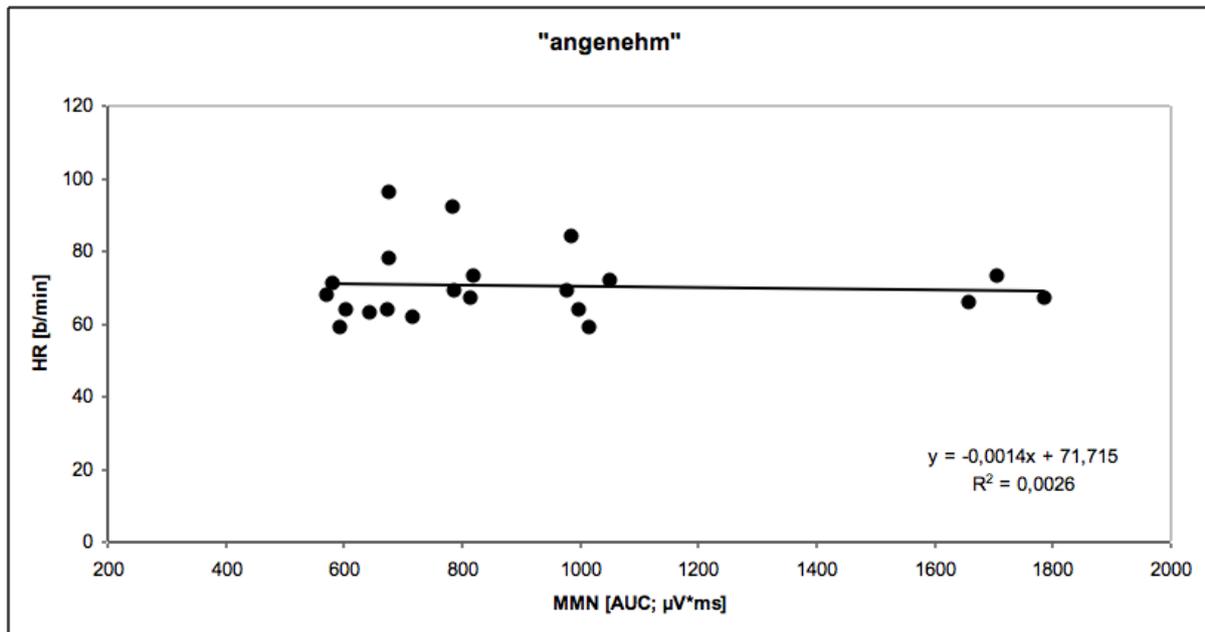


Abbildung 6: Korrelationsmatrix von MMN und HR in der angenehmen Bedingung

3.3.1.3 Untersuchungsbedingung „unangenehm“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von 0,168 von einer sehr geringen Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von 0,466 statistisch nicht signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der eher niedrige Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse (0,0283) zeigt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable in sehr geringem Maße (ca. zu 3 Prozent) durch die unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von Variable a vollständig - zu 100 Prozent - durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 7 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschauung legt nahe, dass offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht und ein Eintrag der Regressionsgeraden daher eher zweifelhaft erscheint.

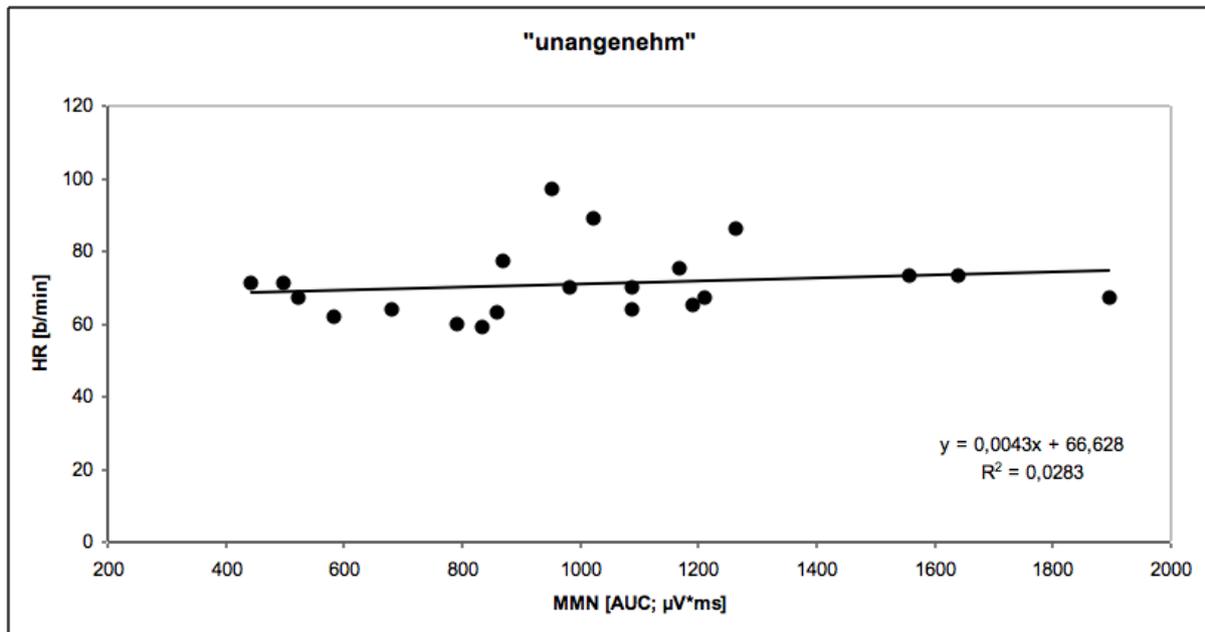


Abbildung 7: Korrelationsmatrix von MMN und HR in der unangenehmen Bedingung

3.3.2 Wertekorrelationen von Mismatch Negativity und Puls Transit Zeit

Die Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalysen von MMN und PTT für die jeweiligen Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“.

		„neutral“	„angenehm“	„unangenehm“
Korrelationskoeffizient nach Pearson	r	-0,208	-0,248	0,029
	p	0,379	0,279	0,901
Regressionsgrade		$y = -0,0116x + 210,45$	$y = -0,0121x + 212,73$	$y = 0,0014x + 201,14$
Bestimmtheitsmaß	R²	0,0432	0,0614	0,0008

Tabelle 4: Korrelationsanalyse MMN und PTT

3.3.2.1 Untersuchungsbedingung „neutral“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von -0,208 von einer geringen Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von 0,379 statistisch nicht signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der niedrige Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse (0,0432) zeigt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable in sehr geringem Maße (ca. zu 5 Prozent) durch die

unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von Variable a vollständig, also zu 100 Prozent, durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 8 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschaunahme legt nahe, dass offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht und ein Eintrag der Regressionsgeraden daher eher zweifelhaft erscheint.

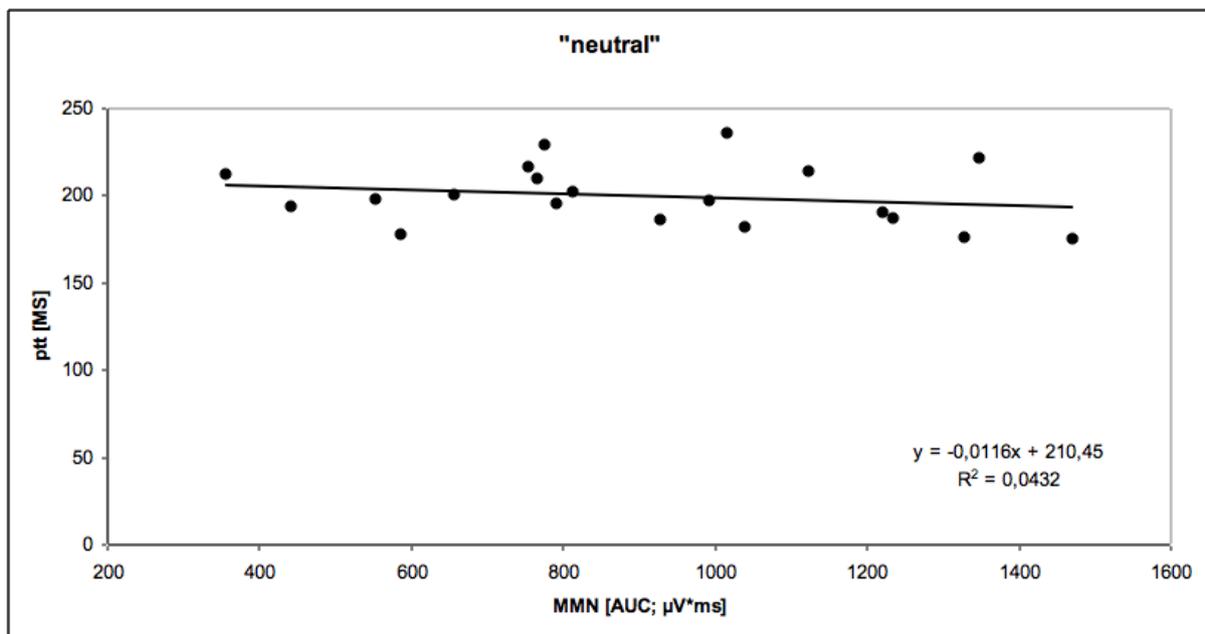


Abbildung 8: Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der neutralen Bedingung

3.3.2.2 Untersuchungsbedingung „angenehm“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von $-0,248$ von einer geringen bis mittleren Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von $0,279$ statistisch nicht signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der niedrige Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse ($0,0614$) belegt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable in geringem Maße (ca. zu 6 Prozent) durch die unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von

Variable a vollständig - zu 100 Prozent - durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 9 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschauahme legt nahe, dass offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht und ein Eintrag der Regressionsgeraden daher eher zweifelhaft erscheint.

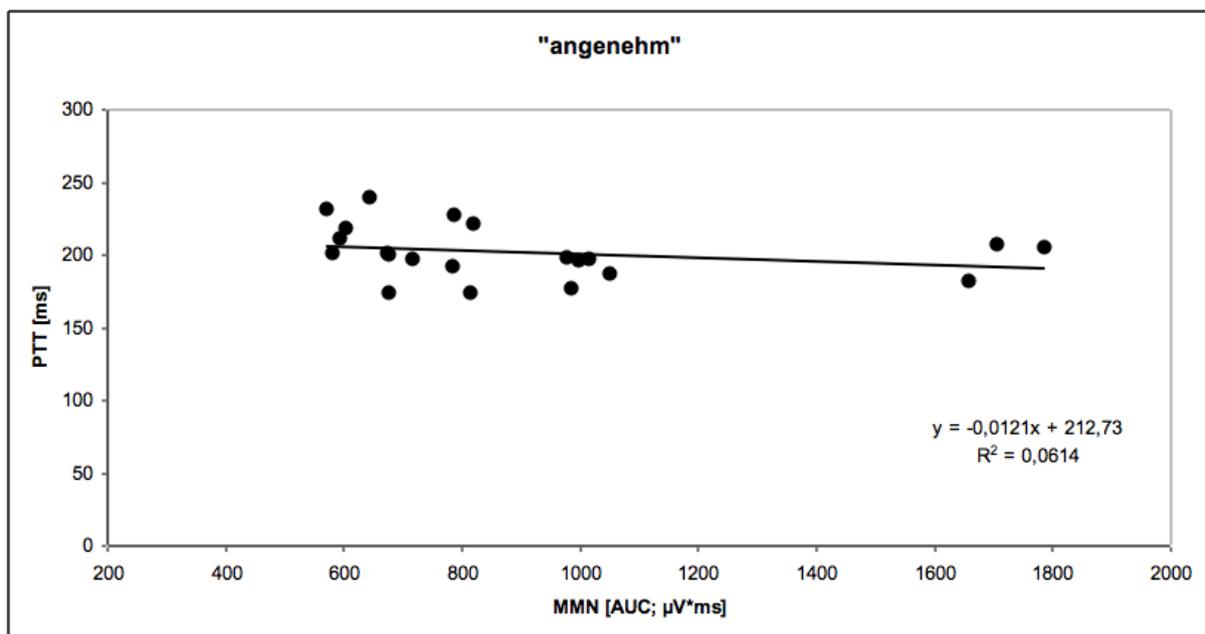


Abbildung 9: Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der angenehmen Bedingung

3.3.2.3 Untersuchungsbedingung „unangenehm“

Entsprechend einer gängigen Interpretation ist bei einem Korrelation-Koeffizient von -0,029 von einer geringen bis mittleren Korrelation auszugehen. Diese ist mit einem p-Wert von 0,901 statistisch nicht signifikant (Bühl & Zöfel, 1994). Der sehr niedrige Wert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus der Regressionsanalyse (0,0008) belegt zudem, dass die jeweilige abhängige Variable kaum Maße (ca. zu 0,1 Prozent) durch die unabhängige Variable erklärt wird (wenn $R^2 = 1$ heißt das, dass die Variabilität von Variable a vollständig - zu 100 Prozent - durch die Variabilität von Variable b erklärt wird).

In Abbildung 10 ist die Korrelationsmatrix der Variablen MMN und HR dargestellt. Schon die visuelle Inanschaunahme legt nahe, dass offensichtlich kein linearer Zusammenhang besteht und ein Eintrag der Regressionsgeraden daher eher zweifelhaft erscheint.

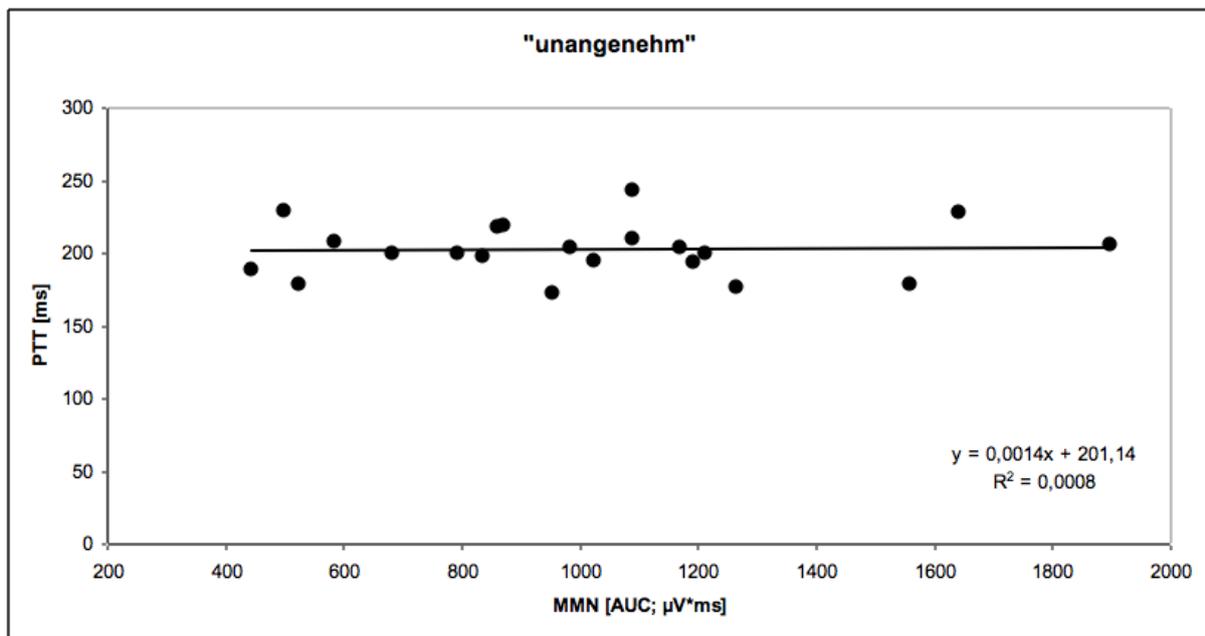


Abbildung 10: Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der unangenehmen Bedingung

4 Diskussion

4.1 Mismatch Negativity

Die in der vorliegenden Untersuchung über das verwendete zwei-Ton Paradigma abgeleitete MMN unterscheidet sich in keiner der unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen („neutral“, „angenehm“, „unangenehm“) signifikant voneinander.

Hieraus lässt sich für den hier verwendeten Versuchsaufbau schlussfolgern, dass die jeweiligen emotionalen und psychovegetativen Zustände keinen interferierenden Effekt auf die durch die MMN repräsentierte präattentive Reizdiskriminierung hatten.

Surakka et al. (1998) konnten in ihrem Versuchsaufbau eine verringerte MMN während der Präsentation von angenehmen Bildmaterial aus dem IAPS messen. Die Autoren gingen angesichts dieser Ergebnisse davon aus, dass ein angenehmer Gefühlszustand mit einem niedrigen Erregungslevel für eine wenig bedrohliche Umwelt spricht, so dass die präattentive Reizdiskriminierung weniger relevant und nötig ist. Auch in einer späteren Untersuchung von Mardaga und Hansenne (2009) wurde eine Veränderung der MMN ermittelt. In dieser Untersuchung fanden die Autoren eine Zunahme der MMN in einer Untersuchungsbedingung mit aus dem IAPS ausgewählten angenehmen Bildern. In Abgrenzung zu der oben aufgeführten Untersuchung gehen die Autoren bei diesem gegensätzlichen Ergebnis davon aus, dass der wesentliche Unterschied im Maß des Arousals, also der Erregung, lag, welches sich in den beiden Untersuchungen voneinander unterschied. Die angeführte, 2009 veröffentlichte Studie hatte Bildmaterial mit einem höheren Arousal verwendet, so dass dieser Faktor führend vor der emotionalen Valenz als wesentlich beeinflussende Größe gesehen wurde.

Bezogen auf das von den Autoren angeführte, relevante und durch das IAPS erzeugte Level des Arousals lässt sich für diese Studie schlussfolgern, dass ein solches offensichtlich nicht erreicht wurde.

Auch konnten die Autoren (Mardaga & Hansenne, 2009) eine Beeinflussung der MMN durch Persönlichkeitszüge der Probanden unabhängig vom emotionalen

Kontext feststellen. Dieser Faktor wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt.

In einer kürzlich veröffentlichten Untersuchung wurden Veränderungen der MMN in durch das IAPS eingeteilte emotional in angenehm, unangenehm und neutral eingeteilte Untersuchungsbedingungen gemessen (Pinheiro, Barros, Dias, & Niznikiewicz, 2017). Es finden sich jedoch mehrere Unterschiede zwischen der vorliegenden und der angeführten Arbeit. So lag der den Probanden kommunizierte und jeweils in einem Fragebogen erhobene Fokus der Untersuchung auf der Veränderung der Stimmung, so dass die Aufmerksamkeit und Wahrnehmung der jeweils untersuchten Person explizit auf dem durch die Bilder verursachten Gefühlszustand lag. In wie weit sich hierdurch eine Verstärkung des emotionalen Zustandes ergibt, bleibt offen. Es kann so angenommen werden, dass unter dieser Voraussetzung eine mit der Betrachtung der Bilder veränderte Aufmerksamkeitsleistung vorhanden war. Dieser Aspekt könnte wie unter Kap. 1.3.3 sowie in Kap. 4.3 angesprochen zu einer Vergrößerung der Amplitude der MMN allein durch die geänderte generelle Aufmerksamkeit beigetragen haben. Daneben wurde eine andere Anzahl und Auswahl der Bilder des IAPS in nach Valenz anders angeordneten Blöcken präsentiert, ein direkter Vergleich des visuellen Stimulusmaterials ist somit nicht möglich. Nicht zuletzt handelt es sich um ein anderes Probandengut, und persönliche Aspekte wie von Mardaga und Harsenne (2009) beschrieben, wurden in keiner der Untersuchungen berücksichtigt.

Schirmer und Escoffier (2010) maßen in ihren Versuchen eine veränderte MMN bei einer bedrohlichen Stimme als Deviant und zugleich eine Erhöhung der Herzrate. Hier sahen die Autoren einen Zusammenhang zwischen Angstlevel, Aktivierung des Sympathischen Nervensystems und der Amplitude der MMN. Für die vorliegende Untersuchung konnte ein derartiger Zusammenhang zwischen einer Aktivierung des Sympathischen Nervensystems und einer Amplitudenänderung der MMN nicht nachgewiesen werden. Ein weiterer und wesentlicher Unterschied in den Ergebnissen ist jedoch, dass sich in der vorliegenden Arbeit keine Erhöhung, sondern eine Erniedrigung der Herzraten messen ließ. Dies kann im Sinne der

Zunahme des Vagustonus bei Mitreaktion des Parasympathikus gewertet werden (Bradley, Codispoti et al. 2001). Somit ist ein Vergleich der Aktivierungsgrade des sympathischen Nervensystems auch nicht möglich. Die Frage nach der Korrelation der PTT und der MMN vor dem Hintergrund einer Mitreaktion des ANS ergab kein Ergebnis von Signifikanz. Obwohl sich in der unangenehmen versus der neutralen Untersuchungsbedingung eine signifikante Änderung der PTT als Hinweis auf einen veränderten Sympathikotonus fand, konnte dieses Ergebnis unter Einbezug der MMN nicht weiter abgebildet werden.

Gemeinsam ist den angeführten Studien, dass jeweils ein interner Erregungszustand als mit bedingend für die gemessene Änderung der MMN gesehen werden kann. Übertragen auf die Grundgedanken der Emotionen nach P.J. Lang (s. Kap. 1.4 mit Unterkapiteln) bestimmt nicht die Valenz, wohl aber das Arousal wesentlich die Beeinflussung der MMN. Basierend auf den angeführten Überlegungen soll weiter diskutiert werden, wie sich die Wahl des die Emotion induzierenden Mediums auf die präattentive Reizdiskriminierung auswirkt.

4.2 Sinneskanäle zur Vermittlung der Emotion

4.2.1 Emotion eingebettet im akustischen Stimulus

Emotionen können auf vielfältigste Arten entstehen und erzeugt werden. Wie bereits in Kap. 1.4.1 angeführt können verschiedene Träger (Filme, Geräusche, Wörter, Geschichten) als Induktor, resp. als Stimulusmaterial, verwendet werden (Cacioppo & Gardner, 1999).

In verschiedenen Untersuchungen konnte eine emotionale Beeinflussung der MMN nachgewiesen werden. Hierbei wurde die Emotion jeweils über den akustischen Reiz vermittelt. Es war also der gleiche Sinneskanal, der sowohl für die Reizdiskrimination als auch für die initiale Verarbeitung der emotionalen Inputs zuständig war. Den akustischen Signalen, die die MMN generierten, wohnte zugleich der emotionale

Gehalt inne, so dass hier eine direkte Beeinflussung der in der MMN ausgedrückten präattentiven Wahrnehmung statt fand.

Die Untersuchung von Schirmer und Escoffier (2010) benutzte eine bedrohliche Stimme als Deviant und konnte eine vergrößerte MMN ableiten. Auch bei De Baene, Vandierendonck et al. (2004) wurde der Deviant mit einem unangenehmen akustischen Attribut gepaart und die MMN zeigte eine Veränderung auf. Die zuletzt von Chen et al. 2018 veröffentlichte Arbeit konnte eine Vergrößerung der MMN-Amplitude bei emotional konnotierten Vokalen, welche als Deviant verglichen mit einem neutralen Standard entweder fröhlich oder ärgerlich gesprochen wurden, replizieren. Auf dem Boden dieser Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass aversive akustische Reize ein höheres Maß, gemessen in der Amplitude der MMN, an präattentiver Reizdiskriminierung mit sich bringen.

Offen bleibt für die Autorin, ob eine im akustischen Stimulus encodierte Emotion nicht auch i.S. eines veränderten physikalischen Kennzeichens des Tones gesehen werden kann. So wird eine MMN wie in Kap. 1.3.1 angeführt bspw. auch bei Änderung der Klangfarbe - als ein Parameter des Tones - evoziert (Goydke et al., 2004; Tervaniemi et al., 1997). Dies wirft die Frage auf, in welchem Ausmaß für die angeführten Untersuchungen nun die Emotion als solche oder der physikalisch veränderte und so die Emotion transportierende Ton die Änderung MMN bedingt.

Für die vorliegende Arbeit wurden Reize verwendet, die nicht direkt die gleichen sensorischen Kanäle benutzten. Zudem bestand kein verbindender Kontext, weder inhaltlich noch anderweitig, zwischen den gezeigten Bildern und den auditiven Reizen. Die Töne waren reine Sinustöne. Daraus ergibt sich für die Autorin die Frage, ob beispielsweise das Benutzen von menschlichen Stimmen als akustischer Standard und Deviant bei der Darstellungen von Menschen in Bildern des IAPS ein anderes Ergebnis erbringen würde.

4.2.2 Emotion herbeigeführt außerhalb der akustischen Modalität

Die durch Bilder des IAPS kontrolliert induzierten emotionalen Zustände und deren Einfluss auf die MMN in den Untersuchungen verschiedener Autoren wurde bereits in Kap. 4.1 dargelegt (Mardaga & Hansenne, 2009; Pinheiro et al., 2017; Surakka et al.,

1998). In diesem Abschnitt sollen anderweitige, nicht im akustischen Reiz liegende, Emotion verursachende Faktoren sowie ihre Beeinflussung der MMN in Bezug auf die vorliegende Studie thematisiert werden.

In der Untersuchung von Cornwell, Baas et al. (2007) waren Probanden während der Stimuluspräsentation zur Ableitung der akustischen MMN phasenweise einer Bedrohung in Form eines erwarteten elektrischen Schocks ausgesetzt. Die generierte MMN in „sicheren“ und „bedrohten“ Phasen wurde anschließend miteinander verglichen. Die Autoren sahen eine Zunahme der neuronalen Aktivität in MMN und mMMN in den „bedrohten“ Phasen und sahen dies i.S. einer erhöhten Vigilanz bei Angst verbunden mit einer verbesserten Fähigkeit, Veränderungen in der akustischen Umgebung zu bemerken. Für diese Untersuchungsbedingung ist möglicherweise ein deutlich höheres Stresslevel zu erwarten verglichen mit einer Untersuchungssituation, in der, so wie in der vorliegenden Arbeit, einzig visuelle und nicht (erwartete) taktile Stimuli Emotionen und Stress im weitesten Sinne erzeugen. Eine gleichzeitige Messung vegetativer Parameter erfolgte in der Untersuchung von Cornwell, Bass et al. (2007) nicht. Daher kann nur hypothetisch angenommen werden, dass ein Unterschied in der autonomen Mitreaktion ausgelöst durch die emotionale Beteiligung bestand. Erklärt werden könnte die dort gemessene Beeinflussung der mMMN durch ein deutlich höheres Arousal und somit wesentlich stärkere Mitreaktion des ANS als in der vorliegenden Studie.

Die in dieser Untersuchung beteiligten Probanden waren allesamt gesund und insbesondere ohne die emotionale Befindlichkeit und das Level des Arousals beeinflussende psychiatrische Erkrankung. Die eine Erregung auslösenden Reize waren visueller Natur und es gab keinen Reiz bzw. Moment in der Versuchsanordnung, der z.B. die körperliche Integrität bedroht hätte. Somit kann für die hier induzierte Emotion und einhergehende vegetative Begleitreaktion nicht von einem Arousal ausgegangen werden, welcher das Ausmaß hat, die MMN zu beeinflussen. Das Erregungslevel, welches durch das verwendete Bildmaterial ausgelöst wurde, hat somit nicht den Wert oder die Intensität überschritten, ab derer es zu einer MMN-Beeinflussung im Sinne einer Änderung der Fläche unter der Kurve

kommt. Dies lässt wie in Kap. 4.1. bereits diskutiert, den Rückschluss zu, dass die MMN im weitesten Sinne durch erlebten Stress i.S. von Erregung beeinflussbar ist, jedoch erst eine gewisse Stress-Schwelle überschritten werden muss, um eine Änderung der MMN zu erreichen.

4.3 Aufmerksamkeitsfokus

Wie bereits in Kap. 1.3.3 dargestellt wird kontrovers diskutiert, in welchem Ausmaß bzw. welcher Art die Aufmerksamkeit die MMN beeinflusst. Diejenigen Untersuchungen, die je andersartigem Aufmerksamkeitsfokus eine veränderte MMN maßen, nutzten Untersuchungsaufbauten, in denen von den Probanden ein erhöhtes Aufmerksamkeitsniveau durch die Testsituation gefordert war. Jeweils war an die zeitgleiche visuelle Aufgabe eine Anforderung gekoppelt, was die Schlussfolgerung zulässt, dass es zu einer insgesamt Zunahme der Aufmerksamkeitsleistung kam, welche sich auch in der Größe der MMN widerspiegelte.

Für die hier vorliegende Versuchsanordnung kann davon ausgegangen werden, dass die erforderte Stärke der Aufmerksamkeit über den gesamten Untersuchungsverlauf insgesamt gleichbleibend war. Anderweitige akustischen Signale, die Aufmerksamkeit auf sich gezogen hätten oder zu einer Überschneidung und möglichen MMN-Beeinflussung während des Versuchsablaufes hätten führen können, gab es nicht. Es sollten einzig die auf dem Bildschirm präsentierten Bilder aufmerksam angesehen werden. Zu lösende Aufgaben, die nach Beendigung des präsentierten Bildmaterials oder auch während der Bildpräsentation an diese geknüpft war, gab es nicht. An dieser Stelle soll auch auf die Diskussion dieses Gedankens in Kap. 4.1. verwiesen werden.

An dieser Stelle bleibt weiter zu diskutieren, ob und in welchem Ausmaß die Bilder, die mit einem höheren Arousal einhergehen, mehr Aufmerksamkeitskapazitäten benötigen. Eine Interferenz der benötigten Ressourcen der Aufmerksamkeit für die verwendeten visuellen und akustischen Stimuli kann aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit nicht angenommen werden.

Neben der MMN sollen nun im sich anschließenden Abschnitt als Ausdruck des Arousal die vegetativen Parameter, sprich die Herzrate und die Pulstransitzeit, in Bezug auf die nach dem IAPS eingeteilten Untersuchungsbedingungen („neutral“, „angenehm“, „unangenehm“) diskutiert werden.

4.4 IAPS und vegetative Parameter

4.4.1 Herzrate

Die Herzrate wurde kontinuierlich über alle drei Untersuchungsbedingungen über das abgeleitete EKG aufgezeichnet. In den vorliegenden Messungen zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Herzrate, welche in den verschiedenen Untersuchungsbedingungen gemessen wurde. Im Mittel sank die Herzrate in Relation zur neutralen Untersuchungsbedingung sowohl in der angenehmen als auch in der unangenehmen signifikant ab. Dies kann in Zusammenhang mit einer einhergehenden vagalen Mitreaktion bei Stress gesehen werden und ist konsistent mit vorangehenden Untersuchungen, welche einen Abfall und Unterschiede der Herzrate je Stimulusvalenz im IAPS fanden (E. M. Bernat et al., 2011; Bradley et al., 2001). Bradley et al. (2001) konnten in ihrem Versuchsaufbau einen Abfall der Herzrate beim Betrachten von unangenehmen Bildmaterial des IAPS messen. Unangenehme Affekte werden nach Ansicht der Autoren mit einer Aktivierung des Abwehrsystems beantwortet. Das Phänomen der sinkenden Herzrate wird in Einklang mit dem von den Autoren postulierten Modell der auf den Reaktionen des autonomen Nervensystems basierender „Abwehrkaskade“ gesehen. Darin findet sich, bezogen auf die Herzrate, zunächst eine Erniedrigung der Frequenz in Situationen, in denen Probanden aversiven Reizen ausgesetzt sind. Dies wird auf die einhergehende parasymphatische Begleitreaktion zurückgeführt. Eine Pulssteigerung geschieht erst beim Überschreiten eines gewissen Maßes an Bedrohung innerhalb des Bildmaterials.

Die angenehme versus die unangenehme Bedingung unterschieden sich hingegen nicht signifikant, der Mittelwert differiert kaum. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass im vorliegenden Versuchsaufbau die Untersuchungsbedingungen „angenehm“ sowie „unangenehm“ jeweils ein vergleichbares Maß an Erregung im Probanden auslösten, die Schwelle, an der eine Herzrate bei Überwiegen des Sympathikus steigen würde, jedoch nicht erreicht war.

4.4.2 Puls Transit Zeit

Die PTT als indirekter Marker für Blutdruckveränderungen wurde während der gesamten Dauer der Untersuchung gemessen und über das EKG als auch die am Zeigefinger angebrachte Plethysmographie-Sonde aufgezeichnet. Sie zeigte einen signifikanten Unterschied in den jeweiligen Untersuchungsmodi. Sie stieg im Mittel sowohl in der angenehmen als auch in der unangenehmen Untersuchungsbedingung im Verhältnis zu der neutralen an. Im einzelnen Vergleich ergab sich jedoch nur ein signifikanter Unterschied der neutralen versus der unangenehmen Untersuchungsbedingung.

Swierblewska, Hering et al. konnten in einer 2010 publizierten Studie zeigen, dass eine Aktivierung des sympathikotonen Muskeltones, gemessen über Mikroneurographie, in signifikantem Zusammenhang mit einer erhöhten Kontraktion der Gefäßmuskulatur und resultierend einer Beschleunigung der Pulswelle stand. Die parasympathische Begleitreaktion, die sich in der in Kap. 4.2.1 diskutierten Beeinflussung der Herzrate zeigt, kann in dem Messparameter der PTT vernachlässigt werden, da sich eine cholinerge parasympathische Innervation der Blutgefäße nur in Herz, Gehirn und den Genitalien findet (Rettig & Kuschinsky, 2013). Es kann daher für die vorliegende Untersuchung auf eine Erhöhung des Sympathikotonus im Rahmen der unangenehmen Untersuchungsbedingung geschlossen werden. Allerdings findet sich hier im Gegensatz zu der angenehmen Bedingung einzig ein signifikanter Unterschied im Vergleich der unangenehmen zu der neutralen Bedingung. In der angenehmen versus der neutralen Bedingung

scheint die Sympathikusaktivierung nicht das Ausmaß erreicht zu haben, um in diesem Versuchsaufbau als signifikanter Einfluss auf die PTT ersichtlich zu werden. I.S. eines limitierenden Faktors ist denkbar, dass die PTT von weitaus mehr Faktoren beeinflusst wird (z.B. Rigidity der Gefäße, Veränderungen durch Arteriosklerose) (Świerblewska, Hering et al. 2010), und sich somit komplexere Zusammenhänge ergeben, die in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurden.

Bezogen auf die Ergebnisse der vegetativen Parameter kann zusammengefasst postuliert werden, dass durch das visuelle Stimulationsmaterial ein signifikanter Effekt auf die Zunahme des in der Mitreaktion des ANS begründeten Arousal gemessen werden konnte. Wie bereits angeführt, war eine mit diesen Werten einhergehende Veränderung der MMN nicht messbar, so dass sich hieraus weiterführende Untersuchungen zum verbessertem Verständnis der Verschränkung des Arousal, dargestellt in vegetativen Messparametern, mit der MMN-Beeinflussung empfehlen würden.

Im nächsten Abschnitt soll in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse und der bereits diskutierten Punkte im Rahmen eines Exkurses die Load Theory in die Diskussion mit einbezogen werden.

4.5 Exkurs - die Load Theory nach N. Lavie

In Lavie's „load theory“ (N. Lavie, 1995; N. Lavie et al., 2014; N. Lavie & Dalton, 2014; G. Murphy, Groeger, & Greene, 2016) wird davon ausgegangen, dass sowohl bewusste als auch unbewusste Wahrnehmung einer begrenzten Verarbeitungskapazität unterliegt.

Entsprechend der Theorie konkurrieren „Targets“, also Zielreize, und „Distractors“, also ablenkende, für die Aufgabenstellung nicht relevante und störende Reize, um Ressourcen der Aufmerksamkeit. Wenn eine Hauptaufgabe alle zur Verfügung stehenden Ressourcen benötigt, somit also einen hohen Informationsgehalt besitzt, dann bleibt für andere, ablenkende oder irrelevante Informationen keine

Aufmerksamkeit(-leistung) mehr übrig, so dass diese weniger bis kaum oder gar nicht verarbeitet werden. Andererseits können nicht relevante Informationen bei Aufgabenstellungen, die wenig Kapazitäten erfordern, weiter prozessiert werden, da hier freie Kapazitäten übrig geblieben sind. Ein extremes, aber weit verbreitetes und bekanntes Beispiel bietet die „Blindheit bei Unaufmerksamkeit“, oder auch in direkter Übersetzung „Unaufmerksamkeitsblindheit“ genannt. Hierbei kann ein visueller Stimulus nicht mehr wahrgenommen werden, da die Aufmerksamkeit der Versuchsperson voll von einer anderen visuellen Aufgabe gebraucht wird (N. Lavie et al., 2014).

Jedoch sind die verschiedenen Ebenen, die von den Effekten der Auslastung bzw. Informationsbelastung in ihrem Prozessieren betroffen sind, nicht spezifisch. Es sind nicht nur diejenigen Level, die dem Bewussten zugänglich sind, sondern sogar sehr frühe Stufen, die unbewusst bleiben, in ihren Möglichkeiten und Fassungsvermögen limitiert. So wird die Bedeutung des „perceptual load“, also des (Informations-) Gehaltes der Wahrnehmung beginnend von unbewussten Stufen bis hin zu bewussten Stadien verdeutlicht (N. Lavie et al., 2014).

Diese Theorie wurde überwiegend an Aufgabenstellungen betreffend die optischen Modalität untersucht. Irrelevante und relevante Informationen in den Untersuchungsbedingungen waren allesamt visuell. Hinsichtlich der Frage, inwieweit sich eine wechselseitige Beeinflussung zwischen zwei Sinnesmodalitäten zeigt, finden sich divergente Ergebnisse (im Review: G. Murphy et al., 2016). Eine Studie untersuchte die Einflussnahme visueller Reizdichten auf die auditive Modalität (Macdonald & Lavie, 2011). Hierbei erfolgte ein gleichzeitiger visueller und ein akustischer Input, um die Beeinflussung der akustischen Aufmerksamkeit durch den Bildgehalt zu untersuchen. Bei einem hohem visuellen Load wurden die Töne mit einem signifikanten Unterschied entweder weniger wahrgenommen oder gar nicht gehört, verglichen mit einem niedrigen visuellen Input. Dies betrifft jedoch die durch den Load erreichte Grenze der Bewusstheit und nicht eine vor-bewusste Wahrnehmung oder Reizdiskriminierung, es wurde explizites Erinnern und Wissen abgefragt.

Ein Übertragen der Load Theorie von der visuellen in die akustischen Modalität ist in Teilen schon möglich und Gegenstand aktueller Forschung. Dies erweist sich jedoch als komplex und in vielen Bereichen nicht eins zu eins übertragbar, da sich die beiden Sinneskanäle doch in vielfältiger Weise voneinander unterscheiden (S. Murphy, Spence, & Dalton, 2017).

Bezogen auf die vorliegende Untersuchung lassen sich nun folgende Gedanken anschließen.

In erster Linie sind in der Load Theory Reizdichten innerhalb einer Sinnesmodalität, überwiegend der visuellen, untersucht worden. Dabei lag der Fokus auf der Aufmerksamkeit und bewussten Prozessierung. Dem gegenüber steht die MMN als Marker für eine, in dieser Studie akustische, präattentive Reizdiskrimination, die unter anderem das Thema der Fähigkeit zur Verarbeitung und Differenzierung von vorbewussten Reizen beleuchtet.

Die Menge der Sinneseindrücke, die der akustische Sinneskanal zu verarbeiten hatte, war in der vorliegenden Untersuchung sehr begrenzt und einzig dafür kreiert, die MMN hervorzurufen. Nebst dem dafür erforderlichen Zwei-Ton-Paradigma gab es keine anderweitigen Störlaute oder anderen Geräusche, die weitere Kapazitäten zur Reizverarbeitung erfordert hätten. Die visuellen Stimuli waren darauf ausgelegt, einen emotionalen Zustand im Probanden hervorzurufen. Für den visuellen Informationsgehalt kann angenommen werden, dass sich die Bilder hinsichtlich der Dichte nicht in für diese Untersuchung relevantem Ausmaß unterschieden. Der wesentliche Unterschied lag in der Vermittlung und im Hervorrufen der Emotion im Probanden.

In der vorliegenden Arbeit findet sich keine signifikante Änderung der MMN je Untersuchungsbedingung. Somit kann die präattentive Reizdiskrimination als ungestört durch den während des Versuchsaufbaus gezeigten Bildfluss und auch als ungestört durch den hier hervorgerufenen emotionalen Zustand beschrieben werden. Die Kapazitäten der vor-bewussten Reizverarbeitung zur Bewältigung des Load sind in dieser Untersuchungsbedingung folglich nicht überschritten. Unser Gehirn hat für

die Anforderungen in dieser Versuchsanordnung für alle Reize ausreichend Ressourcen zur Verfügung.

Was die bewusste Prozessierung der Informationen und dem möglichen Überschreiten der Kapazitäten betrifft kann hier keine abschließende Aussage getroffen werden. Eine mündliche, allerdings nur sporadische Nachfrage bei den Probanden, ob und was sie gehört hatten, ergab ein stimmiges Ergebnis hinsichtlich den „bewussten“ Kapazitäten i.S. der Load Theory. So wurde berichtet, dass die Töne bei der neutralen Bedingung gehört und teilweise als störend empfunden wurden, jedoch in den angenehmen und unangenehmen Bedingungen oftmals nicht mehr wahrgenommen wurden. Hierzu könnte eine Folgestudie diese Fragestellung erneut systematisch aufnehmen um eine weitere Klärung dessen voran zu bringen.

Auch vor dem Hintergrund dieser Theorie kann für die vorliegenden Ergebnisse angenommen werden, dass das Level des Arousal nicht ausreichte, um eine MMN-Amplitudenänderung hervorzurufen. Damit wären die eigentlichen Valenzen der Emotionen nicht vorrangig für die präattentive Reizdiskrimination, sondern die Beeinflussung dessen obliegt primär dem jeweiligen Arousal. An dieser Stelle lassen sich die bereits genannten Gedanken hinsichtlich der Beeinflussbarkeit der MMN sowohl in der MMN-Forschung als auch vor dem Hintergrund der Load Theory vereinen.

4.6 Ausblick

Akustische Reize in einer sich ständig verändernden und potentiell gefährlichen Umwelt zu filtern sowie Unterschiede zu erkennen ist eine wesentliche Fähigkeit, die uns in der Orientierung im Alltag hilft. In dem vorliegenden Versuchsaufbau zeigte sich keine Beeinflussung der MMN, resp. der präattentiven Reizdiskrimination, durch die mittels IAPS hervorgerufenen emotionalen Zustände. Ausgehend von den Ergebnissen dieser sowie anderer Arbeiten entstehen mannigfaltige weitere Forschungsmöglichkeiten.

Das Ausmaß des Arousal und der Stressreaktion und deren Einfluss auf die MMN bleibt ein vorrangig weiter zu untersuchender Punkt.

Zum einen wäre zu untersuchen, ob und welcher Art der Einfluss des Arousal resp. der Stressreaktion auf die MMN besteht. Hierzu wäre ein Versuchsaufbau mit einer kontinuierlichen Zunahme des Stresslevels bei zugleich abgeleiteter MMN erforderlich. Dabei könnte untersucht werden, wie sich die MMN unter einem stetig steigenden Stresslevel, repräsentiert in vegetativen Parametern, verhält. Es könnte angenommen werden, dass es zunächst zu einer Amplitudenzunahme kommt. Dann wäre es höchst interessant herauszufinden, ob es ein Stresslevel gibt, ab dem die MMN letztendlich nicht mehr messbar, das Ausmaß des Stress also zu groß ist, als dass die präattentive akustische Reizdiskrimination noch funktioniert.

Hinsichtlich der Generierung der MMN ist offen, ob es bei einem zu den Bildern passenden, Kontext-bezogenen akustischen Stimulus eine veränderte MMN gäbe. Hypothetisch könnte von einer für die Reizprozessierung bestehende Relevanz der akustischen Inputs für die augenblickliche und induzierte Emotionalität ausgegangen werden. Dies könnte dann eine veränderte präattentive Prozessierung zur Folge haben. Beispielsweise könnte eine menschliche Stimme für die Generierung der MMN verwendet werden, während die Bilder des IAPS mit vorwiegend Abbildungen von Menschen für die jeweiligen Emotionen gezeigt werden. Hierbei ließe sich die Frage untersuchen, inwieweit es eine emotionale Beeinflussung der präattentiven Wahrnehmung in einem Versuchsaufbau mit Kontextbezug zwischen emotionsinduzierenden Bildern und Akustik gibt.

Wie bereits erwähnt ließe sich bezogen auf die Reizprozessierung in verschiedenen Emotionen die hier untersuchte Fragestellung erweitern. Hierbei ließe sich auch sowohl die vorbewusste Reizunterscheidung mittels MMN als auch die Fähigkeit zu einer bewussten Reizunterscheidung beispielsweise durch Fragebögen genauer differenzieren. Damit ließe sich genauer unterscheiden, ob es sich hier um eine Interaktion im Prozess der akustischen Bewusstwerdung handelt, die vorbewusste

Unterscheidungsfähigkeit intakt bleibt oder ob erst die weitere Reizverarbeitung wird eingeschränkt ist.

Vor dem Hintergrund der Load-Theory ließe sich die Frage formulieren, ab welchem Maß an akustischem Input (Load) die MMN in Gesunden im EEG nicht mehr auffällt. Herauszufinden, wo die Reizschwelle liegt, an derer der automatische Vorgang der akustischen Fehlerentdeckung nicht mehr funktioniert, dies stellt eine umfassende Fragestellung dar. Hier bliebe zu untersuchen, ab wann in einer rein akustischen Versuchsbedingung die MMN hervorgerufen durch abweichende Reize in einem komplexen Muster hin bis zum Zwei-Ton-Paradigma nicht mehr hervorgerufen werden kann. Zudem ließe sich untersuchen, ob hier individuelle Faktoren, beispielsweise das Geschlecht oder auch wie bereits beschrieben Persönlichkeitsmerkmale eine Rolle spielen. Ab welcher Reizschwelle der Vorgang der automatisierten Reizdifferenzierung überfordert ist, könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Denkbar ist auch, an dieser Stelle ein Übertrag zwischen Load und Arousal bzw. Sympathikusaktivierung zu versuchen.

In welchem Grad und auf welchen Ebenen die Reizprozessierung der verschiedenen Sinneskanäle zerebrale Ressourcen benötigt wäre eine weiterführende, sehr interessante Fragestellung. Auch könnte die Frage mit einbezogen werden, ob es eine Hierarchie in der Zuteilung von Ressourcen je Sinnesmodalität im Gehirn gibt.

Abschließend, und um die sich abzeichnenden, weiter zu untersuchenden Hypothesen nicht zu überspannen, lässt sich sagen, dass es sich hierbei um ein wirklich weitreichendes und interessantes Thema handelt, bei dem noch viele Fragen die Neugierde weiterer Forscher wecken werden.

5 Zusammenfassung

Die Mismatch Negativity

Orientierung in einer akustischen Umgebung stellt eine wesentliche Fähigkeit dar, derer wir in unserem Alltag bedürfen. Die Mismatch Negativity (MMN) als Bestandteil der Ereignis-Korrelierten Potentiale wird als ein automatisches Hirnstrom-Korrelat gesehen, welches dann in Erscheinung tritt, wenn eine unerwartete Änderung in einem akustischen Reizmuster auftritt. Dies ist unabhängig von dem Aufmerksamkeitsfokus des Probanden und kann sogar in Zuständen von Schlaf oder Koma im EEG festgestellt werden. Daher wird die MMN als ein Marker für vorbewusste akustische Reizdiskrimination beschrieben, eine Begrifflichkeit, die zuletzt kontrovers diskutiert wurde.

Grundsätzlich erfordert es einen akustischen Standard-Reiz, der „Standard“, und einen davon abweichenden Reiz, den „Deviant“, der die zu entdeckende Änderung darstellt. Ausgehend hiervon ist die MMN in verschiedensten Versuchsaufbauten messbar, in denen die Eigenschaft des abweichenden Reizes beispielsweise einzig die Tonhöhe war bis hin zur Missachtung eines abstrakten Musters. Der einfachste Versuchsaufbau ist ein Zwei-Ton-Paradigma, in dem zwei sich in ihrer Tonhöhe unterscheidende Sinustöne abgespielt werden, wobei der Standard mit einer Häufigkeit von 80 % und der zufällig eingestreute Deviant mit einer Häufigkeit von 20 % auftritt.

Das Emotionsmodell nach P.J. Lang

Emotionen stellen einen grundlegenden Bestandteil unseres Lebens dar, die unser Verhalten zumindest teilweise mit bestimmen. Hier wird nach P.J. Lang ein System entlang zweier Achsen erstellt, in dem Emotionen zum einen nach Wertigkeit - also angenehm oder unangenehm - und zum anderen nach einhergehender Erregung, auch Arousal - niedrig oder hoch - eingeteilt werden. Für alle kann eine autonome Begleitreaktion gemessen werden, welche für die jeweiligen emotionalen Zustände charakteristisch ist. Zur standardisierten Induktion solcher emotionaler Zustände

wurde das IAPS entwickelt, mit welchem auf dem genannten Konzept aufbauend in Untersuchungssituationen kontrolliert Emotionen hervorgerufen werden können.

Fragestellung

Die vorliegende Arbeit hat es sich zum Ziel gesetzt, den Einfluss von emotionalen Zuständen, die über Bilder vermittelt wurden, auf die präattentive Reizdiskrimination, verbildlicht in der MMN, zu untersuchen. Zudem wurden die vegetativen Begleitreaktionen als Ausdruck des Maßes der Erregung in Form kardiovaskulärer Parameter mit erhoben, um einen Rückschluss auf Arousal und MMN zu erhalten. Dafür wurde während der Präsentation von IAPS-Bildern in den Valenzen neutral, angenehme und unangenehm über ein Zwei-Ton-Paradigma eine MMN generiert und abgeleitet. Zugleich wurde die Herzrate und die Puls Transit Zeit als vegetative, mitreagierende Parameter erhoben.

Ergebnisse und Diskussion

In den Ergebnissen zeigt sich keine Beeinflussung der Größe der MMN in den verschiedenen Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“, „unangenehm“. Somit wird für diese Arbeit davon ausgegangen, dass die präattentive, akustische Reizdiskrimination trotz der über das IAPS induzierten Emotionen weder beeinträchtigt noch verstärkt war. Es zeigte sich ein Abfall der Herzrate als Ausdruck der parasympathischen Begleitreaktion sowohl in der angenehmen als auch in der unangenehmen Untersuchungsbedingung. Die Puls Transit Zeit war in der unangenehmen Untersuchungsbedingung signifikant erhöht. Dies lässt insgesamt den Rückschluss zu, dass eine Aktivierung des autonomen Nervensystems in sowohl der angenehmen als auch der unangenehmen Bedingungen gegeben war, in der unangenehmen Bedingung jedoch ein höherer Sympathikotonus vorlag.

In Abgrenzung zu anderen Studien, welche die Änderung der MMN in emotionalen Zuständen bzw. Untersuchungsbedingungen mit einem erhöhten Erregungslevel maßen, wird für die vorliegenden Ergebnisse davon ausgegangen, dass das notwendige Arousal, ab dem eine Änderung der MMN-Amplitude eintritt, in dieser Versuchsanordnung noch nicht erreicht ist. Ob hierbei einzig der Stress an sich oder

aber auch der Sinneskanal, über den der Stress vermittelt wird, eine Rolle spielt, bleibt weiter zu klären.

Unter Einbezug des Konstruktes der Load Theory nach N. Lavie, welche die menschliche Fähigkeit, Reize aufzunehmen und zu verarbeiten sowie die diesbezüglichen Kapazitätsgrenzen unseres Gehirnes zum Inhalt hat, wird für diesen Versuchsaufbau angenommen, dass die Kapazitäten der Reizverarbeitung in dieser Untersuchungsbedingung nicht überschritten sind. Es wird davon ausgegangen, dass das Stresslevel auch hier wesentlich die Prozessierungsfähigkeit und die vorbewusste Reizdiskrimination bestimmt.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Untersuchung von Zusammenhang des Arousal und der vorbewussten auditiven Reizdiskrimination unter Einbezug und Erweiterung der Load Theory.

Literaturverzeichnis

- Akatsuka, K., Wasaka, T., Nakata, H., Inui, K., Hoshiyama, M., & Kakigi, R. (2005). Mismatch responses related to temporal discrimination of somatosensory stimulation. *Clin Neurophysiol*, *116*(8), 1930-1937. doi: 10.1016/j.clinph.2005.04.021
- Alain, C., Woods, D. L., & Knight, R. T. (1998). A distributed cortical network for auditory sensory memory in humans. *Brain Res*, *812*(1-2), 23-37.
- Alain, C., Woods, D. L., & Ogawa, K. H. (1994). Brain indices of automatic pattern processing. *Neuroreport*, *6*(1), 140-144.
- Arnsten, A. F. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nat Rev Neurosci*, *10*(6), 410-422. doi: 10.1038/nrn2648
- Atienza, M., Cantero, J. L., & Dominguez-Marin, E. (2002). Mismatch negativity (MMN): an objective measure of sensory memory and long-lasting memories during sleep. *Int J Psychophysiol*, *46*(3), 215-225.
- Auksztulewicz, R., & Friston, K. (2015). Attentional Enhancement of Auditory Mismatch Responses: a DCM/MEG Study. *Cereb Cortex*. doi: 10.1093/cercor/bhu323
- Bernat, E., Patrick, C. J., Benning, S. D., & Tellegen, A. (2006). Effects of picture content and intensity on affective physiological response. *Psychophysiology*, *43*(1), 93-103. doi: 10.1111/j.1469-8986.2006.00380.x
- Bernat, E. M., Cadwallader, M., Seo, D., Vizueta, N., & Patrick, C. J. (2011). Effects of instructed emotion regulation on valence, arousal, and attentional measures of affective processing. *Dev Neuropsychol*, *36*(4), 493-518. doi: 10.1080/87565641.2010.549881
- Berti, S., Roeber, U., & Schroger, E. (2004). Bottom-up influences on working memory: behavioral and electrophysiological distraction varies with distractor strength. *Exp Psychol*, *51*(4), 249-257.
- Bradley, M. M. (2009). Natural selective attention: orienting and emotion. *Psychophysiology*, *46*(1), 1-11. doi: 10.1111/j.1469-8986.2008.00702.x
- Bradley, M. M., Codispoti, M., Cuthbert, B. N., & Lang, P. J. (2001). Emotion and motivation I: defensive and appetitive reactions in picture processing. *Emotion*, *1*(3), 276-298.
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, *45*(4), 602-607. doi: 10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x
- Bühl, A., & Zöfel, P. (1994). Korrelation *SPSS für Windows* (pp. 239 - 250). Bonn: Addison-Wesley.
- Cacciaglia, R., Escera, C., Slabu, L., Grimm, S., Sanjuan, A., Ventura-Campos, N., & Avila, C. (2015). Involvement of the human midbrain and thalamus in auditory deviance detection. *Neuropsychologia*, *68*, 51-58. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.01.001
- Cacioppo, J. T., Crites, S. L., Jr., Gardner, W. L., & Bernston, G. G. (1994). Bioelectrical echoes from evaluative categorizations: I. A late positive brain potential that varies as a function of trait negativity and extremity. *J Pers Soc Psychol*, *67*(1), 115-125.
- Cacioppo, J. T., & Gardner, W. L. (1999). Emotion. *Annu Rev Psychol*, *50*, 191-214. doi: 10.1146/annurev.psych.50.1.191
- Carral, V., Corral, M. J., & Escera, C. (2005). Auditory event-related potentials as a function of abstract change magnitude. *Neuroreport*, *16*(3), 301-305.
- Chen, C., Chan, C. W., & Cheng, Y. (2018). Test-Retest Reliability of Mismatch Negativity (MMN) to Emotional Voices. *Front Hum Neurosci*, *12*, 453. doi: 10.3389/fnhum.2018.00453
- Codispoti, M., Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2001). Affective reactions to briefly presented pictures. *Psychophysiology*, *38*(3), 474-478.

- Codispoti, M., Ferrari, V., & Bradley, M. M. (2006). Repetitive picture processing: autonomic and cortical correlates. *Brain Res, 1068*(1), 213-220. doi: 10.1016/j.brainres.2005.11.009
- Codispoti, M., Ferrari, V., & Bradley, M. M. (2007). Repetition and event-related potentials: distinguishing early and late processes in affective picture perception. *J Cogn Neurosci, 19*(4), 577-586. doi: 10.1162/jocn.2007.19.4.577
- Codispoti, M., Mazzetti, M., & Bradley, M. M. (2009). Unmasking emotion: exposure duration and emotional engagement. *Psychophysiology, 46*(4), 731-738. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00804.x
- Cooper, R. J., Todd, J., McGill, K., & Michie, P. T. (2006). Auditory sensory memory and the aging brain: A mismatch negativity study. *Neurobiol Aging, 27*(5), 752-762. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2005.03.012
- Cornwell, B. R., Baas, J. M., Johnson, L., Holroyd, T., Carver, F. W., Lissek, S., & Grillon, C. (2007). Neural responses to auditory stimulus deviance under threat of electric shock revealed by spatially-filtered magnetoencephalography. *Neuroimage, 37*(1), 282-289. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.04.055
- Costa, V. D., Lang, P. J., Sabatinelli, D., Versace, F., & Bradley, M. M. (2010). Emotional imagery: assessing pleasure and arousal in the brain's reward circuitry. *Hum Brain Mapp, 31*(9), 1446-1457. doi: 10.1002/hbm.20948
- Cowan, N., Winkler, I., Teder, W., & Naatanen, R. (1993). Memory prerequisites of mismatch negativity in the auditory event-related potential (ERP). *J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 19*(4), 909-921.
- Cuthbert, B. N., Schupp, H. T., Bradley, M. M., Birbaumer, N., & Lang, P. J. (2000). Brain potentials in affective picture processing: covariation with autonomic arousal and affective report. *Biol Psychol, 52*(2), 95-111.
- Czigler, I. (2014). Visual mismatch negativity and categorization. *Brain Topogr, 27*(4), 590-598. doi: 10.1007/s10548-013-0316-8
- Czigler, I., Sulykos, I., File, D., Kojouharova, P., & Gaal, Z. A. (2019). Visual mismatch negativity to disappearing parts of objects and textures. *PLoS One, 14*(2), e0209130. doi: 10.1371/journal.pone.0209130
- De Baene, W., Vandierendonck, A., Leman, M., Widmann, A., & Tervaniemi, M. (2004). Roughness perception in sounds: behavioral and ERP evidence. *Biol Psychol, 67*(3), 319-330. doi: 10.1016/j.biopsycho.2004.01.003
- Doeller, C. F., Opitz, B., Mecklinger, A., Krick, C., Reith, W., & Schroger, E. (2003). Prefrontal cortex involvement in preattentive auditory deviance detection: neuroimaging and electrophysiological evidence. *Neuroimage, 20*(2), 1270-1282. doi: 10.1016/S1053-8119(03)00389-6
- Duncan, C. C., Barry, R. J., Connolly, J. F., Fischer, C., Michie, P. T., Naatanen, R., . . . Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clin Neurophysiol, 120*(11), 1883-1908. doi: 10.1016/j.clinph.2009.07.045
- Fischer, C., Luaute, J., Adeleine, P., & Morlet, D. (2004). Predictive value of sensory and cognitive evoked potentials for awakening from coma. *Neurology, 63*(4), 669-673.
- Fishman, Y. I. (2014). The mechanisms and meaning of the mismatch negativity. *Brain Topogr, 27*(4), 500-526. doi: 10.1007/s10548-013-0337-3
- Foo, J. Y., Lim, C. S., & Wang, P. (2006). Evaluation of blood pressure changes using vascular transit time. *Physiol Meas, 27*(8), 685-694. doi: 10.1088/0967-3334/27/8/003
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M., & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neurosci Biobehav Rev, 25*(4), 355-373.

- Frijda, N. H. (1986). *The emotions*. Cambridge Paris: Cambridge University Press ; Editions de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Friston, K. (2003). Learning and inference in the brain. *Neural Netw*, 16(9), 1325-1352. doi: 10.1016/j.neunet.2003.06.005
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 360(1456), 815-836. doi: 10.1098/rstb.2005.1622
- Friston, K. (2008). Hierarchical models in the brain. *PLoS Comput Biol*, 4(11), e1000211. doi: 10.1371/journal.pcbi.1000211
- Friston, K. (2010a). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nat Rev Neurosci*, 11(2), 127-138. doi: 10.1038/nrn2787
- Friston, K. (2010b). Is the free-energy principle neurocentric? *Nat Rev Neurosci*. doi: 10.1038/nrn2787-c2
- Friston, K., & Kiebel, S. (2009). Predictive coding under the free-energy principle. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 364(1521), 1211-1221. doi: 10.1098/rstb.2008.0300
- Friston, K. J. (2005). Models of brain function in neuroimaging. *Annu Rev Psychol*, 56, 57-87. doi: 10.1146/annurev.psych.56.091103.070311
- Gaeta, H., Friedman, D., Ritter, W., & Cheng, J. (2001). The effect of perceptual grouping on the mismatch negativity. *Psychophysiology*, 38(2), 316-324.
- Garrido, M. I., Friston, K. J., Kiebel, S. J., Stephan, K. E., Baldeweg, T., & Kilner, J. M. (2008). The functional anatomy of the MMN: a DCM study of the roving paradigm. *Neuroimage*, 42(2), 936-944. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.05.018
- Garrido, M. I., Kilner, J. M., Stephan, K. E., & Friston, K. J. (2009). The mismatch negativity: a review of underlying mechanisms. *Clin Neurophysiol*, 120(3), 453-463. doi: 10.1016/j.clinph.2008.11.029
- Gomot, M., Giard, M. H., Roux, S., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2000). Maturation of frontal and temporal components of mismatch negativity (MMN) in children. *Neuroreport*, 11(14), 3109-3112.
- Goydke, K. N., Altenmuller, E., Moller, J., & Munte, T. F. (2004). Changes in emotional tone and instrumental timbre are reflected by the mismatch negativity. *Brain Res Cogn Brain Res*, 21(3), 351-359. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2004.06.009
- Grau, C., Escera, C., Yago, E., & Polo, M. D. (1998). Mismatch negativity and auditory sensory memory evaluation: a new faster paradigm. *Neuroreport*, 9(11), 2451-2456.
- Haenschel, C., Vernon, D. J., Dwivedi, P., Gruzelier, J. H., & Baldeweg, T. (2005). Event-related brain potential correlates of human auditory sensory memory-trace formation. *J Neurosci*, 25(45), 10494-10501. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1227-05.2005
- Haroush, K., Hochstein, S., & Deouell, L. Y. (2010). Momentary fluctuations in allocation of attention: cross-modal effects of visual task load on auditory discrimination. *J Cogn Neurosci*, 22(7), 1440-1451. doi: 10.1162/jocn.2009.21284
- Hennig, A., & Patzak, A. (2013). Continuous blood pressure measurement using pulse transit time. *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin*, 17(2), 104-110. doi: 10.1007/s11818-013-0617-x
- Hermans, E. J., Henckens, M. J., Roelofs, K., & Fernandez, G. (2013). Fear bradycardia and activation of the human periaqueductal grey. *Neuroimage*, 66, 278-287. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.10.063
- Hoffmeister, J. (1955). *Wörterbuch der philosophischen Begriffe*. Hamburg: Felix Meiner.
- Jaaskelainen, I. P., Ahveninen, J., Bonmassar, G., Dale, A. M., Ilmoniemi, R. J., Levanen, S., . . . Belliveau, J. W. (2004). Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 101(17), 6809-6814. doi: 10.1073/pnas.0303760101

- Jacobsen, T., & Schroger, E. (2001). Is there pre-attentive memory-based comparison of pitch? *Psychophysiology*, *38*(4), 723-727.
- Javitt, D. C., Steinschneider, M., Schroeder, C. E., & Arezzo, J. C. (1996). Role of cortical N-methyl-D-aspartate receptors in auditory sensory memory and mismatch negativity generation: implications for schizophrenia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *93*(21), 11962-11967.
- Jemel, B., Achenbach, C., Muller, B. W., Ropcke, B., & Oades, R. D. (2002). Mismatch negativity results from bilateral asymmetric dipole sources in the frontal and temporal lobes. *Brain Topogr*, *15*(1), 13-27.
- Jordan, S., & Nitz, C. (2009). *Lexikon Philosophie*. Stuttgart: Philipp Reclam jun.
- Kahkonen, S., Makinen, V., Jaaskelainen, I. P., Pennanen, S., Liesivuori, J., & Ahveninen, J. (2005). Serotonergic modulation of mismatch negativity. *Psychiatry Res*, *138*(1), 61-74. doi: 10.1016/j.psychres.2004.09.006
- Kane, N. M., Curry, S. H., Rowlands, C. A., Manara, A. R., Lewis, T., Moss, T., . . . Butler, S. R. (1996). Event-related potentials--neurophysiological tools for predicting emergence and early outcome from traumatic coma. *Intensive Care Med*, *22*(1), 39-46.
- Kekoni, J., Hamalainen, H., Saarinen, M., Grohn, J., Reinikainen, K., Lehtokoski, A., & Naatanen, R. (1997). Rate effect and mismatch responses in the somatosensory system: ERP-recordings in humans. *Biol Psychol*, *46*(2), 125-142.
- Kisley, M. A., Noecker, T. L., & Guinther, P. M. (2004). Comparison of sensory gating to mismatch negativity and self-reported perceptual phenomena in healthy adults. *Psychophysiology*, *41*(4), 604-612. doi: 10.1111/j.1469-8986.2004.00191.x
- Klinke, R. (2005). Empfindungen - Wahrnehmungen. In R. Klinke, H. C. Pape, & S. Silbernagel (Eds.), *Physiologie* (5th ed., pp. 727-800). Stuttgart: Thieme.
- Kofler, M. (2009). Evozierte Potentiale. In A. Hufschmidt, C. H. Lücking, & S. Rauer (Eds.), *Neurologie compact* (5th ed., pp. 606-617). Stuttgart: Thieme.
- Köhling, R., Bingmann, D., & Speckmann, E. J. (2013). Integrative Funktionen des Nervensystemes. In E. J. Speckmann, J. Hescheler, & R. Köhling (Eds.), *Physiologie* (6th ed.). München: Elsevier.
- Kounalakis, S. N., & Geladas, N. D. (2009). The role of pulse transit time as an index of arterial stiffness during exercise. *Cardiovasc Eng*, *9*(3), 92-97. doi: 10.1007/s10558-009-9081-4
- Kramer, A. F., Trejo, L. J., & Humphrey, D. (1995). Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biol Psychol*, *40*(1-2), 83-100.
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: a review. *Biol Psychol*, *84*(3), 394-421. doi: 10.1016/j.biopsycho.2010.03.010
- Kreitschmann-Andermahr, I., Rosburg, T., Demme, U., Gaser, E., Nowak, H., & Sauer, H. (2001). Effect of ketamine on the neuromagnetic mismatch field in healthy humans. *Brain Res Cogn Brain Res*, *12*(1), 109-116.
- Kujala, T., Tervaniemi, M., & Schroger, E. (2007). The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: theoretical and methodological considerations. *Biol Psychol*, *74*(1), 1-19. doi: 10.1016/j.biopsycho.2006.06.001
- Lane, R. D., Reiman, E. M., Bradley, M. M., Lang, P. J., Ahern, G. L., Davidson, R. J., & Schwartz, G. E. (1997). Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion. *Neuropsychologia*, *35*(11), 1437-1444.
- Lang, P. J. (1979). Presidential address, 1978. A bio-informational theory of emotional imagery. *Psychophysiology*, *16*(6), 495-512.
- Lang, P. J. (1995). The emotion probe. Studies of motivation and attention. *Am Psychol*, *50*(5), 372-385.
- Lang, P. J. (2014). Emotion's Response Patterns: The Brain and the Autonomic Nervous System. *Emotion Review*, *6*(2), 93-99. doi: 10.1177/1754073913512004

- Lang, P. J., & Bradley, M. M. (2010). Emotion and the motivational brain. *Biol Psychol*, *84*(3), 437-450. doi: 10.1016/j.biopsycho.2009.10.007
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1998a). Emotion and motivation: measuring affective perception. *J Clin Neurophysiol*, *15*(5), 397-408.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1998b). Emotion, motivation, and anxiety: brain mechanisms and psychophysiology. *Biol Psychiatry*, *44*(12), 1248-1263.
- Lang, P. J., Greenwald, M. K., Bradley, M. M., & Hamm, A. O. (1993). Looking at pictures: affective, facial, visceral, and behavioral reactions. *Psychophysiology*, *30*(3), 261-273.
- Lang, P. J., & McTeague, L. M. (2009). The anxiety disorder spectrum: fear imagery, physiological reactivity, and differential diagnosis. *Anxiety Stress Coping*, *22*(1), 5-25. doi: 10.1080/10615800802478247
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *21*(3), 451-468.
- Lavie, N., Beck, D. M., & Konstantinou, N. (2014). Blinded by the load: attention, awareness and the role of perceptual load. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *369*(1641), 20130205. doi: 10.1098/rstb.2013.0205
- Lavie, N., & Dalton, P. (2014). Load Theory of Attention and Control. In A. C. Nobre & S. Kastner (Eds.), *The Oxford Handbook of Attention*. Oxford: Oxford University Press.
- LeDoux, J. E. (1995). Emotion: clues from the brain. *Annu Rev Psychol*, *46*, 209-235. doi: 10.1146/annurev.ps.46.020195.001233
- Lee, C. C., & Sherman, S. M. (2011). On the classification of pathways in the auditory midbrain, thalamus, and cortex. *Hear Res*, *276*(1-2), 79-87. doi: 10.1016/j.heares.2010.12.012
- Leung, S., Croft, R. J., Guille, V., Scholes, K., O'Neill, B. V., Phan, K. L., & Nathan, P. J. (2010). Acute dopamine and/or serotonin depletion does not modulate mismatch negativity (MMN) in healthy human participants. *Psychopharmacology (Berl)*, *208*(2), 233-244. doi: 10.1007/s00213-009-1723-0
- Lieder, F., Daunizeau, J., Garrido, M. I., Friston, K. J., & Stephan, K. E. (2013). Modelling trial-by-trial changes in the mismatch negativity. *PLoS Comput Biol*, *9*(2), e1002911. doi: 10.1371/journal.pcbi.1002911
- Lieder, F., Stephan, K. E., Daunizeau, J., Garrido, M. I., & Friston, K. J. (2013). A neurocomputational model of the mismatch negativity. *PLoS Comput Biol*, *9*(11), e1003288. doi: 10.1371/journal.pcbi.1003288
- Loveless, N., Levanen, S., Jousmaki, V., Sams, M., & Hari, R. (1996). Temporal integration in auditory sensory memory: neuromagnetic evidence. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *100*(3), 220-228.
- Low, A., Frey, J. D., Gorzka, R., Engers, A., Wendt, M., Hollmer, H., & Jacobsen, T. (2019). Multifeature Mismatch Negativity in Patients With Posttraumatic Stress Disorder. *Clin EEG Neurosci*, *50*(3), 147-153. doi: 10.1177/1550059418814976
- Low, A., Lang, P. J., Smith, J. C., & Bradley, M. M. (2008). Both predator and prey: emotional arousal in threat and reward. *Psychol Sci*, *19*(9), 865-873. doi: 10.1111/j.1467-9280.2008.02170.x
- Macdonald, J. S., & Lavie, N. (2011). Visual perceptual load induces inattentive deafness. *Atten Percept Psychophys*, *73*(6), 1780-1789. doi: 10.3758/s13414-011-0144-4
- Maess, B., Jacobsen, T., Schroger, E., & Friederici, A. D. (2007). Localizing pre-attentive auditory memory-based comparison: magnetic mismatch negativity to pitch change. *Neuroimage*, *37*(2), 561-571. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.05.040
- Mardaga, S., & Hansenne, M. (2009). Do Personality Traits Modulate the Effect of Emotional Visual Stimuli on Auditory Information Processing? *Journal of Individual Differences*, *30*(1), 28-34. doi: 10.1027/1614-0001.30.1.28

- Michie, P. T., Malmierca, M. S., Harms, L., & Todd, J. (2016). The neurobiology of MMN and implications for schizophrenia. *Biol Psychol*, *116*, 90-97. doi: 10.1016/j.biopsycho.2016.01.011
- Morgan, C. A., 3rd, & Grillon, C. (1999). Abnormal mismatch negativity in women with sexual assault-related posttraumatic stress disorder. *Biol Psychiatry*, *45*(7), 827-832.
- Morlet, D., & Fischer, C. (2014). MMN and novelty P3 in coma and other altered states of consciousness: a review. *Brain Topogr*, *27*(4), 467-479. doi: 10.1007/s10548-013-0335-5
- Muller-Gass, A., Stelmack, R. M., & Campbell, K. B. (2005). "...and were instructed to read a self-selected book while ignoring the auditory stimuli": the effects of task demands on the mismatch negativity. *Clin Neurophysiol*, *116*(9), 2142-2152. doi: 10.1016/j.clinph.2005.05.012
- Murphy, G., Groeger, J. A., & Greene, C. M. (2016). Twenty years of load theory-Where are we now, and where should we go next? *Psychon Bull Rev*, *23*(5), 1316-1340. doi: 10.3758/s13423-015-0982-5
- Murphy, S., Spence, C., & Dalton, P. (2017). Auditory perceptual load: A review. *Hear Res*. doi: 10.1016/j.heares.2017.02.005
- Naatanen, R. (2000). Mismatch negativity (MMN): perspectives for application. *Int J Psychophysiol*, *37*(1), 3-10.
- Naatanen, R., Gaillard, A. W., & Mantysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol (Amst)*, *42*(4), 313-329.
- Naatanen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huottilainen, M., Ilvonen, A., . . . Alho, K. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, *385*(6615), 432-434. doi: 10.1038/385432a0
- Naatanen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clin Neurophysiol*, *118*(12), 2544-2590. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.026
- Naatanen, R., Syssoeva, O., & Takegata, R. (2004). Automatic time perception in the human brain for intervals ranging from milliseconds to seconds. *Psychophysiology*, *41*(4), 660-663. doi: 10.1111/j.1469-8986.2004.00182.x
- Naatanen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychol Bull*, *125*(6), 826-859.
- Naismith, S. L., Mowszowski, L., Ward, P. B., Diamond, K., Paradise, M., Kaur, M., . . . Hermens, D. F. (2012). Reduced temporal mismatch negativity in late-life depression: an event-related potential index of cognitive deficit and functional disability? *J Affect Disord*, *138*(1-2), 71-78. doi: 10.1016/j.jad.2011.12.028
- Novitski, N., Alho, K., Korzyukov, O., Carlson, S., Martinkauppi, S., Escera, C., . . . Naatanen, R. (2001). Effects of acoustic gradient noise from functional magnetic resonance imaging on auditory processing as reflected by event-related brain potentials. *Neuroimage*, *14*(1 Pt 1), 244-251. doi: 10.1006/nimg.2001.0797
- Novitski, N., Huottilainen, M., Tervaniemi, M., Naatanen, R., & Fellman, V. (2007). Neonatal frequency discrimination in 250-4000-Hz range: electrophysiological evidence. *Clin Neurophysiol*, *118*(2), 412-419. doi: 10.1016/j.clinph.2006.10.008
- Novustat. (2018, July 23). Spss boxplot richtig interpretieren – was sie aus grafiken lernen können. Retrieved 16.05.2019, from <https://novustat.com/statistik-blog/spss-boxplot-interpretieren.html>
- Opitz, B., Rinne, T., Mecklinger, A., von Cramon, D. Y., & Schroger, E. (2002). Differential contribution of frontal and temporal cortices to auditory change detection: fMRI and ERP results. *Neuroimage*, *15*(1), 167-174. doi: 10.1006/nimg.2001.0970
- Oranje, B., Jensen, K., Wienberg, M., & Glenthøj, B. Y. (2008). Divergent effects of increased serotonergic activity on psychophysiological parameters of human attention. *Int J Neuropsychopharmacol*, *11*(4), 453-463. doi: 10.1017/S1461145707008176

- Paavilainen, P., Degerman, A., Takegata, R., & Winkler, I. (2003). Spectral and temporal stimulus characteristics in the processing of abstract auditory features. *Neuroreport*, *14*(5), 715-718. doi: 10.1097/01.wnr.0000064985.96259.ce
- Pazo-Alvarez, P., Cadaveira, F., & Amenedo, E. (2003). MMN in the visual modality: a review. *Biol Psychol*, *63*(3), 199-236. doi: 10.1016/s0301-0511(03)00049-8
- Pecina, S. (2008). Opioid reward 'liking' and 'wanting' in the nucleus accumbens. *Physiol Behav*, *94*(5), 675-680. doi: 10.1016/j.physbeh.2008.04.006
- Pekkonen, E., Jousmaki, V., Kononen, M., Reinikainen, K., & Partanen, J. (1994). Auditory sensory memory impairment in Alzheimer's disease: an event-related potential study. *Neuroreport*, *5*(18), 2537-2540.
- Pekkonen, E., Rinne, T., Reinikainen, K., Kujala, T., Alho, K., & Naatanen, R. (1996). Aging effects on auditory processing: an event-related potential study. *Exp Aging Res*, *22*(2), 171-184. doi: 10.1080/03610739608254005
- Pinheiro, A. P., Barros, C., Dias, M., & Niznikiewicz, M. (2017). Does emotion change auditory prediction and deviance detection? *Biol Psychol*, *127*, 123-133. doi: 10.1016/j.biopsycho.2017.05.007
- Qiao, Z., Yu, Y., Wang, L., Yang, X., Qiu, X., Zhang, C., . . . Yang, Y. (2013). Impaired pre-attentive change detection in major depressive disorder patients revealed by auditory mismatch negativity. *Psychiatry Res*, *211*(1), 78-84. doi: 10.1016/j.psychres.2012.07.006
- Restuccia, D., Vollono, C., Scaloni, L., Buccelletti, F., & Camardese, G. (2016). Abnormality of Auditory Mismatch Negativity in Depression and Its Dependence on Stimulus Intensity. *Clin EEG Neurosci*, *47*(2), 105-112. doi: 10.1177/1550059415584704
- Rettig, R., & Kuschinsky, W. (2013). Kreislauf. In E.-J. Speckmann, R. Hescheler, & R. Köhling (Eds.), *Physiologie* (Vol. 6th). München.
- Rinne, T., Alho, K., Ilmoniemi, R. J., Virtanen, J., & Naatanen, R. (2000). Separate time behaviors of the temporal and frontal mismatch negativity sources. *Neuroimage*, *12*(1), 14-19. doi: 10.1006/nimg.2000.0591
- Rinne, T., Gratton, G., Fabiani, M., Cowan, N., Maclin, E., Stinard, A., . . . Naatanen, R. (1999). Scalp-recorded optical signals make sound processing in the auditory cortex visible? *Neuroimage*, *10*(5), 620-624. doi: 10.1006/nimg.1999.0495
- Ritter, W., Sussman, E., Molholm, S., & Foxe, J. J. (2002). Memory reactivation or reinstatement and the mismatch negativity. *Psychophysiology*, *39*(2), 158-165. doi: 10.1017/S0048577202001622
- Ritz, T., George, C., & Dahme, B. (2000). Respiratory resistance during emotional stimulation: evidence for a nonspecific effect of experienced arousal? *Biol Psychol*, *52*(2), 143-160.
- Rosburg, T., Kreitschmann-Andermahr, I., & Sauer, H. (2004). [Mismatch negativity in schizophrenia research. An indicator of early processing disorders of acoustic information]. *Nervenarzt*, *75*(7), 633-641. doi: 10.1007/s00115-003-1674-3
- Ruby, P., Caclin, A., Boulet, S., Delpuech, C., & Morlet, D. (2008). Odd sound processing in the sleeping brain. *J Cogn Neurosci*, *20*(2), 296-311. doi: 10.1162/jocn.2008.20023
- Sabatinelli, D., Bradley, M. M., Fitzsimmons, J. R., & Lang, P. J. (2005). Parallel amygdala and inferotemporal activation reflect emotional intensity and fear relevance. *Neuroimage*, *24*(4), 1265-1270. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.12.015
- Sabatinelli, D., Bradley, M. M., Lang, P. J., Costa, V. D., & Versace, F. (2007). Pleasure rather than salience activates human nucleus accumbens and medial prefrontal cortex. *J Neurophysiol*, *98*(3), 1374-1379. doi: 10.1152/jn.00230.2007
- Sabatinelli, D., Lang, P. J., Keil, A., & Bradley, M. M. (2007). Emotional perception: correlation of functional MRI and event-related potentials. *Cereb Cortex*, *17*(5), 1085-1091. doi: 10.1093/cercor/bhl017

- Sabri, M., & Campbell, K. B. (2001). Effects of sequential and temporal probability of deviant occurrence on mismatch negativity. *Brain Res Cogn Brain Res*, *12*(1), 171-180.
- Sabri, M., Kareken, D. A., Dziedzic, M., Lowe, M. J., & Melara, R. D. (2004). Neural correlates of auditory sensory memory and automatic change detection. *Neuroimage*, *21*(1), 69-74.
- Sams, M., Hari, R., Rif, J., & Knuutila, J. (1993). The Human Auditory Sensory Memory Trace Persists about 10 sec: Neuromagnetic Evidence. *J Cogn Neurosci*, *5*(3), 363-370. doi: 10.1162/jocn.1993.5.3.363
- Schirmer, A., & Escoffier, N. (2010). Emotional MMN: Anxiety and heart rate correlate with the ERP signature for auditory change detection. *Clin Neurophysiol*, *121*(1), 53-59. doi: 10.1016/j.clinph.2009.09.029
- Schroger, E., & Wolff, C. (1996). Mismatch response of the human brain to changes in sound location. *Neuroreport*, *7*(18), 3005-3008.
- Schupp, H. T., Junghofer, M., Weike, A. I., & Hamm, A. O. (2003). Emotional facilitation of sensory processing in the visual cortex. *Psychol Sci*, *14*(1), 7-13.
- Sharwood-Smith, G., Bruce, J., & Drummond, G. (2006). Assessment of pulse transit time to indicate cardiovascular changes during obstetric spinal anaesthesia. *Br J Anaesth*, *96*(1), 100-105. doi: 10.1093/bja/aei266
- Slabu, L., Grimm, S., & Escera, C. (2012). Novelty detection in the human auditory brainstem. *J Neurosci*, *32*(4), 1447-1452. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2557-11.2012
- Smith, R. A., J; Pépin, J-L; Lévy, P. (1999). Pulse transit time: an appraisal of potential clinical applications. *Thorax*, *Vol.54*(5), p.452.
- Surakka, V., Tenhunen-Eskelinen, M., Hietanen, J. K., & Sams, M. (1998). Modulation of human auditory information processing by emotional visual stimuli. *Brain Res Cogn Brain Res*, *7*(2), 159-163.
- Sussman, E., Ritter, W., & Vaughan, H. G., Jr. (1998). Predictability of stimulus deviance and the mismatch negativity. *Neuroreport*, *9*(18), 4167-4170.
- Sussman, E., & Winkler, I. (2001). Dynamic sensory updating in the auditory system. *Brain Res Cogn Brain Res*, *12*(3), 431-439.
- Sussman, E., Winkler, I., & Wang, W. (2003). MMN and attention: competition for deviance detection. *Psychophysiology*, *40*(3), 430-435.
- Sussman, E. S., Chen, S., Sussman-Fort, J., & Dinces, E. (2014). The five myths of MMN: redefining how to use MMN in basic and clinical research. *Brain Topogr*, *27*(4), 553-564. doi: 10.1007/s10548-013-0326-6
- Sussman, E. S., & Gumenyuk, V. (2005). Organization of sequential sounds in auditory memory. *Neuroreport*, *16*(13), 1519-1523.
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, *150*(3700), 1187-1188.
- Świerblewska, E., Hering, D., Kara, T., Kunicka, K., Kruszewski, P., Bieniaszewski, L., . . . Narkiewicz, K. (2010). An independent relationship between muscle sympathetic nerve activity and pulse wave velocity in normal humans. *J Hypertens*, *28*(5), 979-984. doi: 10.1097/HJH.0b013e328336ed9a
- Tervaniemi, M., Winkler, I., & Naatanen, R. (1997). Pre-attentive categorization of sounds by timbre as revealed by event-related potentials. *Neuroreport*, *8*(11), 2571-2574.
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K., & Naatanen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, *372*(6501), 90-92. doi: 10.1038/372090a0
- Todorovic, A., & de Lange, F. P. (2012). Repetition suppression and expectation suppression are dissociable in time in early auditory evoked fields. *J Neurosci*, *32*(39), 13389-13395. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2227-12.2012

- Trepel, M. (2004). Vegetatives Nervensystem. In M. Trepel (Ed.), *Neuroanatomie* (3rd ed., pp. 277-296). München: Elsevier.
- Tse, C. Y., Rinne, T., Ng, K. K., & Penney, T. B. (2013). The functional role of the frontal cortex in pre-attentive auditory change detection. *Neuroimage*, *83*, 870-879. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.07.037
- Umbricht, D., Schmid, L., Koller, R., Vollenweider, F. X., Hell, D., & Javitt, D. C. (2000). Ketamine-induced deficits in auditory and visual context-dependent processing in healthy volunteers: implications for models of cognitive deficits in schizophrenia. *Arch Gen Psychiatry*, *57*(12), 1139-1147.
- Umbricht, D., Vollenweider, F. X., Schmid, L., Grubel, C., Skrabo, A., Huber, T., & Koller, R. (2003). Effects of the 5-HT_{2A} agonist psilocybin on mismatch negativity generation and AX-continuous performance task: implications for the neuropharmacology of cognitive deficits in schizophrenia. *Neuropsychopharmacology*, *28*(1), 170-181. doi: 10.1038/sj.npp.1300005
- Uther, M., Jansen, D. H., Huotilainen, M., Ilmoniemi, R. J., & Naatanen, R. (2003). Mismatch negativity indexes auditory temporal resolution: evidence from event-related potential (ERP) and event-related field (ERF) recordings. *Brain Res Cogn Brain Res*, *17*(3), 685-691.
- van Zuijen, T. L., Simoens, V. L., Paavilainen, P., Naatanen, R., & Tervaniemi, M. (2006). Implicit, intuitive, and explicit knowledge of abstract regularities in a sound sequence: an event-related brain potential study. *J Cogn Neurosci*, *18*(8), 1292-1303. doi: 10.1162/jocn.2006.18.8.1292
- Vico, C., Guerra, P., Robles, H., Vila, J., & Anllo-Vento, L. (2010). Affective processing of loved faces: contributions from peripheral and central electrophysiology. *Neuropsychologia*, *48*(10), 2894-2902. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.031
- Wacongne, C., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2012). A neuronal model of predictive coding accounting for the mismatch negativity. *J Neurosci*, *32*(11), 3665-3678. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5003-11.2012
- Weinberg, A., & Hajcak, G. (2010). Beyond good and evil: the time-course of neural activity elicited by specific picture content. *Emotion*, *10*(6), 767-782. doi: 10.1037/a0020242
- Weiss, T., Del Bo, A., Reichek, N., & Engelman, K. (1980). Pulse transit time in the analysis of autonomic nervous system effects on the cardiovascular system. *Psychophysiology*, *17*(2), 202-207.
- Wienberg, M., Glenthøj, B. Y., Jensen, K. S., & Oranje, B. (2010). A single high dose of escitalopram increases mismatch negativity without affecting processing negativity or P300 amplitude in healthy volunteers. *J Psychopharmacol*, *24*(8), 1183-1192. doi: 10.1177/0269881109102606
- Wiens, S., Szychowska, M., & Nilsson, M. E. (2016). Visual Task Demands and the Auditory Mismatch Negativity: An Empirical Study and a Meta-Analysis. *PLoS One*, *11*(1), e0146567. doi: 10.1371/journal.pone.0146567
- Wijnen, V. J., van Boxtel, G. J., Eilander, H. J., & de Gelder, B. (2007). Mismatch negativity predicts recovery from the vegetative state. *Clin Neurophysiol*, *118*(3), 597-605. doi: 10.1016/j.clinph.2006.11.020
- Winkler, I., Karmos, G., & Naatanen, R. (1996). Adaptive modeling of the unattended acoustic environment reflected in the mismatch negativity event-related potential. *Brain Res*, *742*(1-2), 239-252.
- Winkler, I., Kujala, T., Alku, P., & Naatanen, R. (2003). Language context and phonetic change detection. *Brain Res Cogn Brain Res*, *17*(3), 833-844.
- Winkler, I., & Schroger, E. (2015). Auditory perceptual objects as generative models: Setting the stage for communication by sound. *Brain Lang*, *148*, 1-22. doi: 10.1016/j.bandl.2015.05.003

- Winkler, I., Teder-Salejarvi, W. A., Horvath, J., Naatanen, R., & Sussman, E. (2003). Human auditory cortex tracks task-irrelevant sound sources. *Neuroreport*, *14*(16), 2053-2056. doi: 10.1097/01.wnr.0000095496.09138.6d
- Winkler, R., & Aehlig, K. (1998). Temporal variation of thoron decay product concentration in the atmosphere and comparison with radon decay product concentration. *Radiat Environ Biophys*, *37*(1), 35-39.
- Yabe, H., Tervaniemi, M., Reinikainen, K., & Naatanen, R. (1997). Temporal window of integration revealed by MMN to sound omission. *Neuroreport*, *8*(8), 1971-1974.
- Yago, E., Escera, C., Alho, K., & Giard, M. H. (2001). Cerebral mechanisms underlying orienting of attention towards auditory frequency changes. *Neuroreport*, *12*(11), 2583-2587.
- Yucel, G., Petty, C., McCarthy, G., & Belger, A. (2005). Visual task complexity modulates the brain's response to unattended auditory novelty. *Neuroreport*, *16*(10), 1031-1036.

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1	Differenzkurve (Deviant minus Standard) = Mismatch Negativity (MMN)..... 11
Abbildung 2	Flächen der MMN für die drei Untersuchungsbedingungen [AUC, $\mu\text{V}\cdot\text{ms}$]..... 49
Abbildung 3	Herzrate (HR) für die drei Untersuchungsbedingungen [bpm]..... 50
Abbildung 4	Puls Transit Zeit für die drei Untersuchungs- bedingungen [ms]..... 51
Abbildung 5	Korrelationsmatrix von MMN und HR in der neutralen Bedingung..... 55
Abbildung 6	Korrelationsmatrix von MMN und HR in der angenehmen Bedingung..... 56
Abbildung 7	Korrelationsmatrix von MMN und HR in der unangenehmen Bedingung..... 57
Abbildung 8	Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der neutralen Bedingung..... 58
Abbildung 9	Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der angenehmen Bedingung..... 59
Abbildung 10	Korrelationsmatrix von MMN und PTT in der unangenehmen Bedingung..... 60

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1	statistische Kennwerte (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Min-Max) der Variablen MMN, HR und PTT für die Untersuchungsbedingungen „neutral“, „angenehm“ und „unangenehm“ 48
Tabelle 2	statistische Kennwerte (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Min-Max) der Variablen MMN, HR und PTT sowie statistischer Gruppenvergleich..... 52
Tabelle 3	Korrelationsanalyse MMN und HR..... 54
Tabelle 4	Korrelationsanalyse MMN und PTT..... 57

Danksagung

Mein Dank gilt allen, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben und ohne die diese Dissertationsschrift nicht zustande gekommen wäre.

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr. Ulrich Bogdahn für die Übernahme der Betreuung der Dissertationsarbeit. Gleicher Dank gilt Herrn Dr. Michael Schröder für die Unterstützung, Geduld, Beratung und Betreuung während der Planung und Fertigstellung der Arbeit.

Ebenso möchte ich meinem Vater für die Unterstützung sowie unumstößliche Zuversicht in die Fertigstellung dieser Arbeit danken.

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeit erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.