

Aus der Klinik für Innere Medizin, Schwerpunkt Pneumologie  
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Claus Vogelmeier  
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

**Veränderung der elektrischen Hirnaktivität während  
Vigilanzuntersuchungen im Hinblick auf  
unterschiedliche motivationale Testbedingungen**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades  
der gesamten Humanmedizin  
dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

Christina Saßmannshausen  
aus Siegen

Marburg, 2018

Angenommen vom Fachbereich Medizin  
der Philipps-Universität Marburg am: 16.08.2018  
Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.  
Dekan: Prof. Dr. Helmut Schäfer  
Referent: Prof. Dr. Ulrich Koehler  
Korreferent: Prof. Dr. Andreas Jansen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Definition von Vigilanz .....	1
1.2. Zugrunde liegende neurophysiologische Prozesse .....	2
1.3. Testverfahren zur Messung von Aufmerksamkeit und Vigilanz.....	3
1.3.1.VigiMar.....	6
1.3.2.Der pupillographische Schläfrigkeitstest .....	7
1.4. Die Widerspiegelung von Aufmerksamkeit, Vigilanz und Schlaf im EEG ....	8
1.4.1.Bestimmung der Schlafstadien mittels EEG-Aufzeichnungen .....	8
1.4.2.Korrelate der Vigilanz und zentralnervöser Aktivierung in EEG-Aufzeichnungen.....	9
1.5. Der Zusammenhang zwischen Vigilanztestergebnissen und EEG-Parametern	12
1.6. Fragestellung .....	15
<b>2. Material und Methoden.....</b>	<b>18</b>
2.1. Studiendesign.....	18
2.1.1.Ein- und Ausschlusskriterien.....	18
2.1.2.Ablauf der Studie.....	19
2.2. Der VigiMar .....	24
2.2.1.Testaufbau .....	24
2.2.2.Vorbereitung und Testdurchführung .....	25
2.2.3.Datenauswertung .....	26
2.2.4.Ergebnisbewertung.....	28
2.3. Der Pupillographische Schläfrigkeitstest.....	28
2.3.1.Testaufbau .....	28
2.3.2.Die Detektion der Pupille.....	29
2.3.3.Vorbereitung und Testdurchführung .....	29
2.3.4.Datenauswertung und Ergebnisprotokoll .....	30
2.4. Die Polysomnographie .....	31
2.5. Die Auswertung der EEG – Aufzeichnungen .....	32
2.5.1. Die EEG-Poweranalyse.....	32
2.6. Statistische Methoden .....	35
<b>3. Ergebnisse .....</b>	<b>37</b>
3.1. Stichprobenbeschreibungen .....	37
3.2. Testergebnisse und hirnelektrische Aktivität während der Tests .....	37

3.2.1.Hirnelektrische Total-Power und Testergebnisse .....	38
3.2.2.Hirnelektrische Alpha-, Beta-, und Gamma-Aktivität und Testergebnisse..	
40	
3.2.3.Hirnelektrische Delta- und Theta-Aktivitäten und Testergebnisse.....	48
3.3. Nächtliche hirnelektrische Aktivität und Testergebnisse am nächsten Mor-	
gen	51
3.3.1.Nächtliche hirnelektrische Total-Power und Testergebnisse am nächsten	
Morgen .....	51
3.3.2.Nächtliche hirnelektrische Alpha- Beta- und Gamma-Aktivitäten und	
Testergebnisse am nächsten Morgen .....	51
3.3.3.Nächtliche hirnelektrische Delta- und Theta-Aktivitäten und Testergeb-	
nisse am nächsten Morgen.....	57
3.4. Nächtliche und morgendliche hirnelektrische Aktivität während der Tests...	
64	
3.4.1.Nächtliche Total-Power und absolute Power während der Nacht und wäh-	
rend des VigiMars am nächsten Morgen.....	64
3.4.2.Relative Power während der Nacht und Power während des VigiMars am	
nächsten Morgen.....	69
3.4.3.Total-Power und absolute Power während der Nacht und während des	
PSTs am nächsten Morgen.....	73
3.4.4.Relative Power während der Nacht und während des PSTs am nächsten	
Morgen.....	73
3.5. Hirnelektrische Delta- und Theta-Power in der Nacht und am nächsten	
Morgen während der Tests.....	74
3.5.1.Nächtliche Delta- und Theta-Power und morgendliche Delta- und Theta-	
Power während des VigiMars .....	74
3.5.2.Nächtliche Theta- und Delta Power und morgendliche Theta- und Delta-	
Power während des PSTs .....	77
3.6. Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während der Tests unter Be-	
lohnungs- und Teilnahmebedingungen .....	79
<b>4. Diskussion.....</b>	<b>83</b>
4.1. Diskussion der Methoden.....	83
4.2. Diskussion der Ergebnisse .....	85
<b>5. Fazit</b>	<b>102</b>
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>105</b>
<b>7. Summary.....</b>	<b>108</b>
<b>8. Anhang.....</b>	<b>110</b>
8.1. Literaturverzeichnis .....	110
8.3. Verzeichnis der akademischen Lehrer .....	116

8.4. Danksagung .....	117
-----------------------	-----

### 1. Einleitung

Vigilanz und Aufmerksamkeit sind Ressourcen, die in unserer Arbeitswelt einen sehr hohen Stellenwert haben. Berufskraftfahrer z.B. müssen über Stunden hinweg trotz oft monotoner Arbeitsbedingungen voll konzentriert sein. Nicht erholsamer Schlaf bzw. Schlafstörungen in ihrer unterschiedlichen Form können zu Tagesschläfrigkeit und Vigilanzminderung führen. Die Beeinträchtigung kann so schwerwiegend sein, dass eine normale Berufstätigkeit oder auch die Teilhabe am täglichen Leben nicht mehr adäquat möglich sind.

Durch ein breites Spektrum an unterschiedlichen Aufmerksamkeitstests versucht man Vigilanzminderungen messbar zu machen. Im Schlafmedizinischen Zentrum der Philipps-Universität Marburg haben sich der in Marburg entwickelte Vierfachwahl-Reaktionszeit-Test „VigiMar“ und der pupillographische Schläfrigkeitstest „PST“ bewährt.

Die Möglichkeit Wachheit, Schläfrigkeit bzw. das zentrale Aktivitätsniveau während der Aufmerksamkeitstests elektrophysiologisch mittels EEG-Aufzeichnungen darzustellen, könnte zu einer höheren Aussagekraft der Testergebnisse beitragen.

Ziel dieser Arbeit ist es, Zusammenhänge während der Tests und der vorherigen Nacht darzustellen, um eventuelle Einflussfaktoren wie Schlafentzug und Motivation anders einschätzen zu können.

Von Interesse ist ebenfalls, ob und inwieweit Schlafentzug und Motivation Einfluss auf die Hirnaktivität haben.

#### 1.1. Definition von Vigilanz

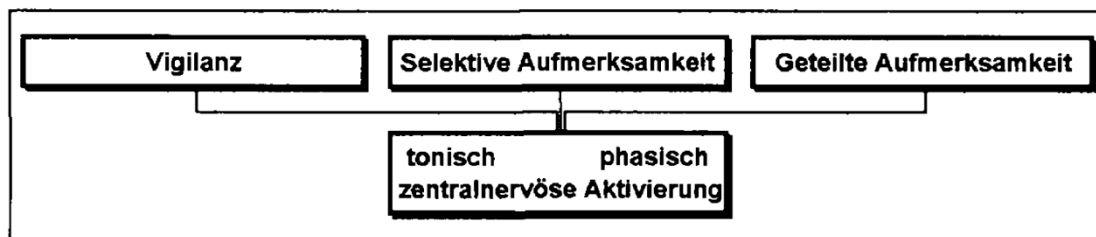
Die Fähigkeit, über einen langen Zeitraum wach, aufmerksam und reaktionsbereit zu sein, nennt man Vigilanz. Ursprünglich wurde der Begriff Vigilanz von dem lateinischen Wort „vigilia“, der Nachtwache abgeleitet und wurde wissenschaftlich zum ersten Mal von Head in 1923 benutzt (Head 1923).

Aus psychologischer und neurokognitiver Sicht wird Vigilanz als eine „unspezifische organismische Reaktionsbereitschaft, die Aufmerksamkeit über einen

längeren Zeitraum auf einem hohen oder höheren Niveau zu halten (...)“ (Weeß et al. 1998) definiert. Man spricht von „Daueraufmerksamkeit“.

Die Frage nach der Definition von Aufmerksamkeit ist schon lange nicht mehr so einfach wie zu Zeiten von William James, der der Meinung war „Every one knows what attention is“ (James 1950). Das zurzeit gängigste Verständnis von Aufmerksamkeit in der Wissenschaft beruht auf dem Aufmerksamkeitsmodell von Posner und Rafal. Die unterschiedlichen Aspekte der Aufmerksamkeit teilen sich demnach in tonische und phasische zentralnervöse Aktivierung, selektive Aufmerksamkeit, geteilte Aufmerksamkeit und Vigilanz auf (Weeß et al. 2000). Einen guten Überblick über die Zusammenhänge der einzelnen Komponenten bietet hierbei das Aufmerksamkeitsmodell nach Weeß von 1998.

**Abbildung 1:** Modell der Leistungsfähigkeit zugrundeliegenden Aufmerksamkeitskomponenten (Weeß et al. 1998).



Nach Weeß (1998) geht der Vigilanz, die der willentlichen Kontrolle unterliegt, die zentralnervöse Aktivierung voraus. Während die tonische zentralnervöse Aktivierung von der Tageszeit abhängt, wird die phasische zentralnervöse Aktivierung auch von Signalen der Außenwelt beeinflusst und kann so die Aufmerksamkeit vorübergehend steigern.

### **1.2. Zugrunde liegende neurophysiologische Prozesse**

Die zugrundeliegenden neurophysiologischen Prozesse der zentralnervösen Aktivierung spielen sich in vielen verschiedenen neuronalen Systemen des Hirnstamms, Thalamus, limbischen Systems und der Hirnrinde ab, werden aber auch durch metabolische und endokrine Vorgänge in der Körperperipherie beeinflusst (Oken et al. 2006). Der mit der Zirbeldrüse verbundene Nucleus su-

prachiasmaticus im ventralen Thalamus fungiert als zirkadianer Taktgeber, indem er unter anderem die Melatoninausschüttung beeinflusst. Endokrine Systeme, wie z.B. die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenachse, die den Blutspiegel des Stresshormons Kortison steuert und der Hypophysen-Schilddrüsen-Regelkreis mit dem aktivierenden Schilddrüsenhormon T<sub>3</sub> beeinflussen ebenfalls die zentralnervöse Erregung. Die Körperperipherie und das zentrale Nervensystem werden unter anderem über das aufsteigende retikuläre aktivierende System (ARAS) miteinander verbunden. In der Formatio reticularis sitzt das Weckzentrum. Sensibel-sensorische Afferenzen aus dem Hinterhorn des Rückenmarks werden hier in acetylcholinerge Signale umgewandelt und aktivieren den Thalamus und indirekt die Großhirnrinde (Trepel 2012). Weitere Neurotransmittersysteme wie das Locus Coeruleus-Noradrenalin-System, das Raphe-Serotonin-System, das Tuberomamilläre-Histamin-System und das Acetylcholin-System, die jeweils untereinander, aber auch mit zahlreichen anderen Hirnnervenkernen kommunizieren, modulieren unspezifisch die Erregung des Thalamus und der Großhirnrinde (Oken et al. 2006).

Im Gegensatz zu dieser unwillkürlichen Steuerung der zentralnervösen Erregung, die den Prozessen der Vigilanz vorausgeht, wird die Vigilanz auch durch den Willen beeinflusst. Durch eine hohe Motivation, z.B. eine langandauernde Aufgabe gut zu bewältigen, kann man die Vigilanz auf Dauer steigern.

### **1.3. Testverfahren zur Messung von Aufmerksamkeit und Vigilanz**

Verschiedene aufmerksamkeits- und vigilanzmindernde Erkrankungen, wie z.B. die Schlafapnoe oder das Restless-Legs-Syndrom, erfordern es, den Grad der Beeinträchtigung messbar zu machen. Ein subjektives Gefühl von Müdigkeit oder Erschöpfung muss hierbei klar von dem wissenschaftlichen Begriff der Schläfrigkeit getrennt werden. Laut Mathis (2009) sei subjektive Müdigkeit nicht direkt messbar, sondern könne nur durch das Individuum selbst beschrieben werden. Erst die funktionalen Beeinträchtigungen, die sich hieraus ergeben, wie kurze Einschlaflatenz, Aufmerksamkeitsdefizite, verlangsamte kognitive Funktionen und Reaktionszeiten lassen sich auch objektiv bestimmen (Mathis und Hess 2009).



Es ergibt sich also eine Testbatterie aus unterschiedlichen Tests mit Hilfe derer man sowohl subjektive, als auch objektive Testparameter zu erfassen versucht (Mathis und Hess 2009).

Durch zahlreiche Fragebögen, wie die Stanford Sleepiness Scale (SSS), die Epworth Sleepiness Scale (ESS), die Karolinska Sleepiness Scale (KSS), oder auch Einschätzungen nach visuellen Analogskalen, werden subjektive Einschätzungen der Patienten oder Probanden erfasst. Die Messbarmachung der objektiven Parameter lässt sich gut anhand der Tabelle von Weeß (2000) verdeutlichen (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Operationalisierung der einzelnen aufmerksamkeits- bzw. müdigkeitsbezogenen Komponenten (Weeß et al. 2000)

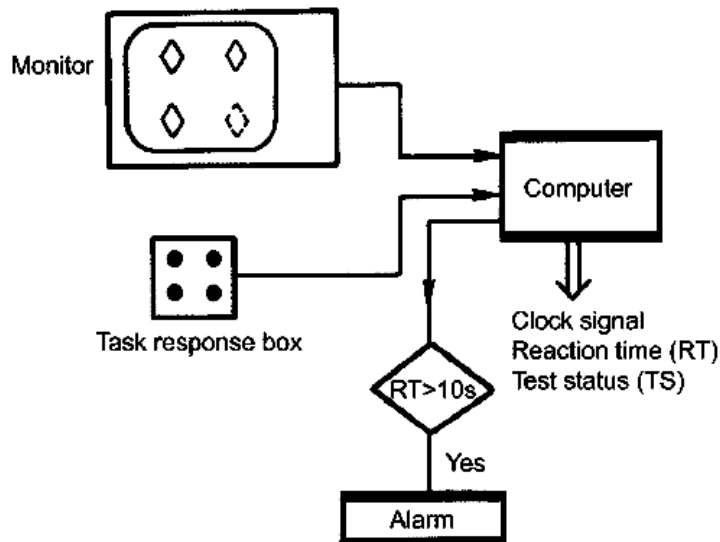
Aufmerksamkeitskomponente	Merkmale	Geeignete Testverfahren
Aktivierung, tonisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circadianer Aspekt des allmeinen Erregungsniveaus, der Wachheit</li> <li>• Unterliegt nicht der bewussten Kontrolle</li> <li>• Der Vigilanz, der selektiven und geteilten Aufmerksamkeit vorausgehend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multipler Schlaf-Latenz-Test</li> <li>• Maintenance of Wakefulness Test</li> <li>• Flimmerverschmelzungsfrequenz</li> <li>• Pupillographie</li> <li>• Langzeit-EEG (standardisiert oder mit Tagebuch)</li> <li>• Evozierte Potenziale (EVP), (N100)</li> <li>• Reaktionszeitmessungen</li> </ul>
Aktivierung, phasisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fähigkeit das tonische Aktivierungsniveau auf einen kritischen Stimulus hin zu erhöhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionszeitmessung mit Warnreiz</li> <li>• EVP (CNV;SN)</li> <li>• TAP (Test selektive Aufmerksamkeit)</li> </ul>
Selektive Aufmerksamkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fähigkeit, unter hohem Tempo die Aufmerksamkeit über längere Zeiträume für eine bestimmte Aufgabe aufrecht zu erhalten</li> <li>• Fähigkeit, Störreize, Interferenzen und Ablenkungen „auszublenden“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionszeittests mit hoher zeitlicher Anforderung (z.B. FCRT)</li> <li>• Arbeitsleistungserie (Wiener Testsystem)</li> <li>• Test „Selektive Aufmerksamkeit“ (TAP)</li> </ul>

<p>Geteilte Aufmerksamkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung</li> <li>• Fähigkeit zu geteilter und paralleler Informationsverarbeitung</li> <li>• Fähigkeit zu automatisierter und kontrollierter Verarbeitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Test „Geteilte Aufmerksamkeit“ (TAP)</li> <li>• Wiener Determinationsgerät</li> </ul>
<p>Vigilanz</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unspezifische organismische Reaktionsbereitschaft, Fähigkeit über lange Zeiträume auf seltene und zufällig auftretende Reize zu reagieren</li> <li>• Unterliegt der bewussten Kontrolle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Test „Vigilanz“ (TAP)</li> <li>• Vigilanztest nach Quatember und Maly</li> <li>• VigiMar</li> </ul>

### 1.3.1. VigiMar

Bei dem in Marburg entwickelten VigiMar handelt es sich um einen Vierfachwahl-Reaktionszeit-Test „mit langer Dauer und niedriger Reizfrequenz, der die Reaktionsbereitschaft unter monotonen, von Reizarmut charakterisierten Bedingungen erfasst“ (Cassel et al. 2011). Der VigiMar wurde 1987 unter anderem angelehnt an die Konzepte von u. a. Head (Head 1923) und Mackworth (Mackworth 1948) entwickelt. Bei diesem automatischen, computergestützten Vigilanztest sitzen die Probanden in gemütlicher Sitzposition alleine für 90 Minuten in einem ruhigen, leicht abgedunkelten Raum und haben die Aufgabe vier Rauten auf einem Bildschirm zu beobachten. In randomisierten Abständen von 10-50 s verschwindet eine der vier Rauten. Der Proband muss reagieren und so schnell wie möglich, mit Hilfe einer Viertastentastatur, die zugehörige Taste (links-oben, links-unten, rechts-oben, rechts-unten) drücken.

**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Testaufbaus (Canisius und Penzel 2007)



Bei korrekter Zuordnung erscheint die Raute wieder. War der Proband zu langsam, oder hat er eine falsche Taste gedrückt, so ertönt ein Signalton. Dies verhindert, dass der Proband während des Tests dauerhaft schläft.

Mit Hilfe des Computers werden mittlere Reaktionszeiten errechnet. Canisius (2007) gibt an, dass Reaktionszeiten unter 1 Sekunde für keine Vigilanzbeeinträchtigung sprechen. Von einer leichten Beeinträchtigung ist ab einer mittleren Reaktionszeit von über 1 Sekunde auszugehen, während man bei einer mittleren Reaktionszeit von über 1,5 Sekunden bereits von einer schweren Vigilanzminderung spräche (Canisius und Penzel 2007). Bisher fehlen allerdings noch Prüfungen zu Validität und Reliabilität. Diese Arbeit soll durch die Analyse hirnelektrischer Korrelate während des VigiMars zur Validierung beitragen.

### 1.3.2. Der pupillographische Schläfrigkeitstest

Der pupillographische Schläfrigkeitstest (PST) wurde 1997 von der Arbeitsgruppe Wilhelm entwickelt und von der Firma AMTech lizenziert. Er basiert auf der ursprünglichen Theorie Lowenstein und Lowenfelds, die zum ersten Mal sogenannte „fatigue waves“ beschrieben (Lüdtke et al. 1998). Demnach komme es zu charakteristischen Veränderungen der Pupillenweite bei schläfrigen Per-

sonen, die durch langsame Oszillation, steigende Amplitude und einem abnehmendem Pupillendurchmesser charakterisiert seien (Lüdtke et al. 1998).

Bei dem PST sitzt der Proband möglichst bequem in einem abgedunkelten Raum auf einem Stuhl, legt sein Kinn auf einer Kinnstütze ab, lehnt mit seiner Stirn an einer Stirnlehne und trägt eine lichtundurchlässige Infrarotbrille. In den folgenden 11 Minuten fixiert der Proband mit beiden Augen einen roten Lichtpunkt. Eine Infrarotvideokamera zeichnet den Pupillendurchmesser auf. Als wichtigste Ergebnisparameter erhält man den Pupillenunruheindex (PUI), der die Änderung der Pupillenweite beschreibt sowie das Amplitudenspektrum, das die Oszillationen der Pupille aufzeichnet (Lüdtke et al. 1998).

Der PST misst im Gegensatz zum VigiMar die tonische zentralnervöse Aktivierung, die zu einem großen Teil durch das aufsteigende retikulär-aktivierende System beeinflusst wird und demnach nicht direkt dem Willen des Probanden unterliegt. Die Validität und Reliabilität des PST wurden in umfangreichen Studien überprüft (Weeß et al. 2000).

Eine genauere Beschreibung der beiden Testverfahren VigiMar und PST erfolgt im Kapitel „Methoden“ (Kapitel 2.2, 2.3)

### **1.4. Die Widerspiegelung von Aufmerksamkeit, Vigilanz und Schlaf im EEG**

Um die unterschiedlichen elektroenzephalographischen Aktivitätsniveaus im Hinblick auf verschiedene Vigilanz- und Aufmerksamkeitsgrade besser zu verstehen, ist es sinnvoll den Übergang von klarer Wachheit bis hin zum Tiefschlaf zu verdeutlichen. Alle Grade unterschiedlicher Aufmerksamkeit liegen zwischen diesen beiden Extremen.

#### **1.4.1. Bestimmung der Schlafstadien mittels EEG-Aufzeichnungen**

Die Schlafstadienanalyse, die in vielen Schlaflaboren manuell durch Medizinisch-Technische Assistenten/innen durchgeführt wird, richtet sich nach dem aktuellen Manual der American Academy of Sleep Medicine (AASM). Rechtschaffen u. Kales veröffentlichten 1968 ein Regelwerk (Proposed supplements and amendments to ‘A Manual of Standardized Terminology, Techniques and

Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects), das sich aufgrund seiner (...) Qualität schnell als Goldstandard der Schlafanalyse behaupten konnte (Rodenbeck 2013). Das in 2007 erschienene Manual der American Academy of Sleep Medicine basiert weiterhin auch auf den Grundsätzen des R&K-Manuals, ist aber stärker evidenzbasiert (Rodenbeck 2013). Basierend auf dem AASM-Manual werden folgende Schlafstadien unterschieden: Stadium Wach, die Non-REM Stadien N1, N2, N3 und das Stadium REM.

Im Stadium W treten charakteristischerweise Alpha-Wellen (8-13 Hz) sowie Lidschläge mit einer Frequenz von 0,5 bis 2 Hz, lesende Augenbewegungen oder konjugierte Augenbewegungen bei herabgesetztem Kinnmuskeltonus auf. Im Stadium N1 werden die Alpha-Wellen durch Frequenzen um 4-7 Hz, niedrigere Amplituden und gemischte Frequenzen ersetzt. Außerdem sind Vertexwellen und langsame Augenbewegungen charakteristisch. Während sich das Stadium N2 durch K-Komplexe und Schlafspindeln auszeichnet, findet man im Stadium N3 bereits sehr langsame Frequenzen um 0,5-2 Hz und Amplituden von über 75  $\mu$ V. Im REM-Schlafstadium, Stadium R findet man schnelle Augenbewegungen, Tonusverlust im EMG (Elektromyogramm), sogenannte Sägezahnwellen und kurze Serien von Muskelaktivitäten im EMG.

### **1.4.2. Korrelate der Vigilanz und zentralnervöser Aktivierung in EEG-Aufzeichnungen**

Neben dem Versuch durch subjektive Schläfrigkeitsfragebögen, Aktigrafie oder Messung der Augenbewegung, Blinzelrate, oder Herzfrequenzvariabilität Aussagen über die Schläfrigkeit eines Individuums zu machen, hat sich besonders die Elektroenzephalographie als geeignetes Messinstrument herausgestellt (Johnson et al. 2011). Die EEG-Aufzeichnung einer entspannten wachen Person, die die Augen geschlossen hält, zeigt eine charakteristische „Ruhegrundaktivität“. Bei den meisten Menschen handelt es sich hierbei um Alpha-Wellen, die sich besonders gut okzipital messen lassen (Zschocke und Hansen 2012). Sobald die Augen geöffnet werden, verschwinden diese Alpha-Wellen und werden von Beta-Wellen ersetzt. Man spricht von einer Alpha-Blockade. Je müder eine Person ist, desto häufiger bleibt trotz Augenöffnung der Alpha-Grundrhythmus bestehen. Ein angeregter, aktiver Zustand, z.B. bei angestrengtem Nachdenken,

zeigt sich im EEG mit vermehrter Beta-Aktivität und einer Desynchronisation. Sinkende Aufmerksamkeit geht mit einer Zunahme langsamer Frequenzen im EEG einher (beta→alpha→theta→delta). Hierbei kann die Verlangsamung der Frequenzen immer wieder durch „Arousals“, Weckreize durch sensorische Impulse, unterbrochen werden und der Grundrhythmus kurzfristig zurückkehren (Kursawe und Kubicki 2012). Besonders nach Schlafentzug, wenn die Müdigkeit sehr stark ist und nicht mehr deutlich durch andere Einflussfaktoren wie starkes Interesse oder Motivation beeinflusst werden kann, lassen sich charakteristische EEG-Veränderungen bei zunehmender Müdigkeit feststellen.

In der Literatur findet man zahlreiche Versuche, Vigilanz und zentralnervöse Aktivierung quantitativ zu beschreiben und genauer zu lokalisieren. Gevins et al. beobachteten bereits 1977, dass Müdigkeit mit einem Anstieg des Verhältnisses von Delta- zu Alpha-Frequenzen, sowie Theta- zu Alpha-Frequenzen führen (Gevins et al. 1977). Matousek et al. definierten das Verhältnis von Theta- und Delta-Frequenzen zu Alpha- und Beta-Frequenzen als ansteigende Müdigkeitsparameter (Matousek und Petersén 1983). Nach Belyavin et al. eignen sich besonders die ansteigende Theta- und die abnehmende Beta-Aktivität für die quantitative Erfassung der hirnelektrischen Vigilanzminderung. Bei den Alpha-Wellen sei eine Beurteilung aufgrund der unterschiedlichen Aktivitäten bei geschlossenen oder geöffneten Augen nicht so einfach. Bei Müdigkeit und geschlossenen Augen zeige sich demnach eine sinkende Alpha-Aktivität, während verminderte Aufmerksamkeit bei offenen Augen mit steigender Alpha-Aktivität einhergehe. Weiterhin zu erwähnen sei, dass sich bei der Beobachtung der Alpha-Aktivität eine hohe interindividuelle Variabilität ergäbe, während sich die Beta- und Theta-Aktivität wenig unterscheiden (Belyavin und Wright 1987). Kalauzi et al. beschäftigten sich 2012 erneut mit den Veränderungen der Alpha-Aktivität während des Übergangs von Wachheit zu Müdigkeit. Die Veränderung der Alpha-Aktivität unterscheide sich in den verschiedenen Hirnarealen. So verändere sich zuerst die frontale und fronto-temporale Aktivität, während sich die Veränderung in okzipitalen Arealen erst später und in geringerem Ausmaß zeige (Kalauzi et al. 2012). Strijkstra et al. untersuchten 2003 die Korrelate subjektiver Müdigkeit im EEG und entdeckten eine verminderte Alpha-Aktivität über allen Regionen und einen Anstieg der fronto-zentralen Theta-Aktivität (Strijkstra et al. 2003). Während sich die Autoren über die Verlangsamung des

EEGs bei Müdigkeit enig zu sein scheinen, bleibt weiterhin die Frage nach dem geeigneten Parameter offen. Craig et al. fassten 2012 die Ergebnisse von 17 verschiedenen Studien zu Müdigkeitszeichen im EEG in einer Tabelle zusammen (Craig et al. 2012) (siehe Tabelle 2).

Es wird deutlich wie relativ uneinheitlich Veränderungen der Hirnaktivität bei Müdigkeit in der Literatur beschrieben werden. Aufgrund der bisherigen Datenlage scheint dennoch die Theta-Aktivität am besten als hirnelektrisches Korrelat für Müdigkeit zu dienen.



**Tabelle 2:** Details aus verschiedenen Studien zu EEG-Veränderungen bei Müdigkeit (Craig et al. 2012)

**Table 1.** Details of Studies That Have Investigated EEG Changes as a Person Fatigues

Reference/Study	No. of participants	Delta	Theta	Alpha	Beta	Sites
Åkerstedt et al., 1991	25	NS	NS	↑	NR	1 (B)
Caldwell et al., 2002	10	↑	↑	↓	NS	6
Cajochen et al., 1995	9	NR	↑	↑	NR	2
Cajochen et al., 1996	8	NR	↑	↑	NR	2
Campagne et al., 2004	46	NR	↑	↑	NR	4
Dumont et al., 1997	9	NR	↑	↑	NR	1 (M)
Eoh et al., 2005	8	NR	NS	↑	↓	8
Kecklund & Åkerstedt, 1993	18	NR	↑	↑	NR	1 (B)
Lal & Craig, 2002	35	↑	↑	↑	↑	19
Macchi et al., 2002	8	NR	↑	↑	NR	8
Pal et al., 2008	13	NR	↑	↑	NR	1 (M)
Papadelis et al., 2006	20	↓	↑	↑	NS	16
Schier, 2000	2	NR	NR	↑	NR	4
Strijkstra et al., 2003	10	NR	↑	↓	NR	28
Tanaka et al., 1997	10	↑	↑	↑	↑	12
Torsvall & Åkerstedt, 1987	11	↑	↑	↑	NR	1 (B)
Trejo et al., 2005	16	NR	↑	↑	NR	30

Notes. ↑ = significant increase in activity in EEG bands; ↓ = significant decrease in activity in EEG bands; NS = no significant change; NR = impact not reported. For single channel studies, (B) = bipolar configuration; (M) = monopolar configuration with reference to A1 or A2.

### 1.5. Der Zusammenhang zwischen Vigilanztestergebnissen und EEG-Parametern

Müdigkeit und Unaufmerksamkeit bzw. Wachheit und Aufmerksamkeit hirnelektrisch zu messen ist besonders sinnvoll, wenn man sie mit den Ergebnissen bei Vigilanztests vergleicht. Hierdurch wird sichergestellt, dass man nicht die Korrelate unterschiedlicher subjektiver Müdigkeitsphänomene misst, sondern durch objektive Aufmerksamkeitstests vergleichbar gemachte Grade von Vigilanz und zentralnervöser Aktivierung miteinander vergleichen kann. In der Literatur findet man zahlreiche Studien, bei denen EEG-Aufzeichnungen mit Vigilanztests kombiniert wurden. Leider finden sich bisher sehr unterschiedliche und inkonsistente Ergebnisse. Zu kleine Teilnehmerzahlen, interindividuelle Unterschiede der Hirnaktivität, unterschiedliche Testbedingungen sowie technische Ungenauigkeiten führen zu teilweise uneinheitlichen Ergebnissen. Einige Tendenzen lassen sich dennoch bei genauer Betrachtung entnehmen.

Belyavin et al. untersuchten in ihrer Studie die EEG-Korrelation in einem einfachen visuellen Vigilanztest (30 min) und einem Buchstaben-Unterscheidungs-Test (40 min). Besonders die Ergebnisse während des einfachen Vigilanztests korrelierten mit den gemessenen EEG-Frequenzen (Belyavin und Wright 1987). Ähnlich wie in der Studie von O`Hanlon et al. zeigte sich ein Ansteigen der Theta- und ein Absinken der Beta-Aktivität während der Phasen mit schlechte-

ren Reaktionszeiten und höheren Fehlerraten (O'Hanlon und Beatty 1977). Auch das Auftreten von Frequenzen im Schlafspindelbereich korrelierte mit sehr hohen Fehlerraten im Test (Jung et al. 1997; Makeig und Jung 1996).

Cajochen et al. konnten in ihrer Studie langsame Frequenzen von 1-4 Hz und Theta-Aktivität nachweisen. Diese zeigten sich insbesondere frontal und ließen sich schlechten Ergebnissen während eines psychomotorischen Vigilanztests (PVT) zuordnen (Cajochen et al. 1999).

In einigen weiteren Studien zeigte sich ebenfalls ein Anstieg der Theta-Aktivität als hirnelektrisches Korrelat für schlechte Performance bei psychomotorischen Vigilanztests ((Caldwell et al. 2003; Corsi-Cabrera et al. 1996). Bei Kaida et al. sprachen eine hohe Alpha- und eine hohe Theta-Aktivität für eine schlechtere Performance im 40 minütigen Mackworth-Clock-Test (Kaida et al. 2007). Lorenzo et al. stellten 1995 bei 40 stündigem Schlafentzug eine zunehmende Theta-Aktivität, aber auch eine zunehmende Beta-Aktivität während eines einfachen alle 2 Stunden durchgeführten Vigilanztests fest (Lorenzo et al. 1995).

Chua et al. untersuchte interindividuelle Unterschiede der Schlafentzugsvulnerabilität und teilte 2013 30 Probanden in für Schlafentzug vulnerable und resiliente Probanden auf. Nach 26 stündigem Schlafentzug mussten die Probanden einen 10 minütigen Vigilanztest durchführen. Hierbei zeigte sich bei vulnerablen Probanden sowohl vor, als auch nach Schlafentzug eine höhere Theta- und Delta-Power, als bei den resilienten Probanden. Bei beiden Gruppen zeigte sich allerdings ein gleicher Anstieg der Delta- und Theta-Aktivität bei zunehmender Müdigkeit (Chua et al. 2014b).

Neu et al. unterteilte 2015 die Schlafzeit in der Nacht in zwei Abschnitte à 3 Stunden und einer 2 stündigen Pause zwischen den beiden Schlafperioden. Im Zuge des innerhalb der Schlafpause durchgeführten 10-minütigen Reaktionszeittests zeigten sich bei niedrigerer Vigilanz niedrigere Delta-Aktivität und eine höhere Theta-Aktivität. Weiterhin zeigte sich eine höhere Einschlafneigung bei niedriger Sigma- und Beta-Aktivität sowie schlechtere Testergebnisse bei niedriger Gamma-Aktivität. Nach dem zweiten Wecken ging hohe Delta- und niedrige Beta-Aktivität mit einer niedrigeren Vigilanz einher. Bei hoher Alpha-Power resultieren zudem mehr Fehler (Neu et al. 2015).

Corsi-Cabrera et al. beobachteten unter Schlafentzug bei einem visuellen Vigilanztest sowohl einen Anstieg der Reaktionszeiten, als auch einen Anstieg der abso-

luten Power (zwischen 4-20 Hz) im EEG (Corsi-Cabrera et al. 1996). Jung et al. stellten in diesem Zusammenhang fest, dass die Betrachtung des „full EEG power spectrum“ die Aufmerksamkeit teilweise besser vorhersagen kann als einzelne Frequenzbandanalysen (Jung et al. 1997).

Zu berücksichtigen seien aber weiterhin auch die unterschiedlichen Zeitabschnitte der Vigilanztestung, die sich ebenfalls auf die EEG-Korrelate auswirken und sich in tonische, phasische und passager auftretende EEG-Korrelate aufteilen lassen (Makeig und Jung 1996).

Bei einer neueren Studie von Craig et al. bei der die Vigilanz mit Hilfe eines Fahrsimulators eingeschätzt wurde, zeige sich mit zunehmender Testdauer ebenfalls ein Anstieg langsamerer Frequenzen bei Vigilanzminderung über dem gesamten Kortex. Neben dem Anstieg der Theta- und Alpha-Aktivitäten wurde aber auch eine vermehrte Beta-Aktivität beobachtet. Craig et al. deuteten diese als das hirnelektrische Korrelat für den Versuch der Probanden, die Vigilanz wieder zu steigern (Craig et al. 2012).

Kamzanova et al. untersuchten auch den Einfluss des Schwierigkeitsgrades des Vigilanztests auf die Vigilanz. Hierbei wurden 92 Probanden untersucht, die aufgeteilt in zwei Gruppen während eines schwierigen und eines leichteren 40 minütigen Vigilanztest bezüglich der EEG-Frequenzen untersucht wurden. Eine höhere Alpha-Aktivität sprach bei beiden Gruppen für schlechtere Testergebnisse. Es zeigte sich zudem, dass bei dem schwierigen Vigilanztest bessere Ergebnisse erzielt wurden (Kamzanova et al. 2014).

Auch Hoedlmoser et al. konnten in 2011 ähnliche Beobachtungen machen. Während sich die tonische EEG-Aktivität und simultan dazu auch die Reaktionszeiten bei einem psychomotorischen Vigilanztest bei zunehmender Müdigkeit verlangsamen (vermehrte Delta- und Theta-Aktivität), nehme die phasische Komponente der langsamen Delta- und Theta-Aktivität bei zunehmender Müdigkeit ab. Demnach sollte man also nicht nur Müdigkeit im EEG untersuchen und mit Vigilanztestergebnissen vergleichen, sondern auch die Auswirkungen der Vigilanztests auf den Probanden berücksichtigen (Hoedlmoser et al. 2011).

Visuelle oder auditorische Signale z.B. können zu kurzfristigen Arousal und damit vermehrter, schneller EEG-Aktivität führen. Aus diesem Grund wurden in einigen Studien ERPs (event related potentials) oder der sogenannte PLI

(phase locking index) ermittelt. Hierbei wurde die zentralnervöse Aktivierung im Zusammenhang mit Testereignissen betrachtet.

Trotz alledem lässt sich zusammenfassend vor allem die Zunahme der Theta- und Alpha-Aktivität sowohl bei subjektiver Müdigkeit, als auch bei objektiver Vigilanzminderung, gemessen durch verschiedene Vigilanztests, als Zeichen von Schläfrigkeit werten (Akerstedt und Gillberg 1990; Torsvall und Akerstedt 1987; Otmani et al. 2005). Inwiefern sich diese Ergebnisse auf den langen VigiMar und den kurzen PST übertragen lassen, ist noch offen.

Auch „psychophysiologische“ Variablen wie z.B. die Motivation des Probanden, Testanforderungen, oder die Tageszeit, haben Einfluss auf die zentralnervöse Aktivierung (Johnson et al. 2011).

Eine weitere große Rolle zur Beurteilung der Vigilanztestergebnisse spielt die individuelle Verfassung der Patienten. Nach einer schlaflosen Nacht etwa, würde man eine deutliche Beeinträchtigung der Vigilanz erwarten. Ziel sollte also sein, diese unbekannt Variablen optimierter einschätzen zu können, um eine realistische Beurteilung der Vigilanztestergebnisse vornehmen zu können.

### **1.6. Fragestellung**

Die zentralnervöse Aktivierung und Vigilanz während Aufmerksamkeitstests mit Hilfe von EEG-Messungen ergänzen zu können, trägt zur Genauigkeit und Objektivierung von Aufmerksamkeitsuntersuchungen bei. Der Marburger Vigilanztest VigiMar wurde bisher noch nicht auf hirnelektrische Korrelate überprüft. Seine Länge und Monotonie über 90 Minuten lassen charakteristische EEG-Veränderungen vermuten. Basierend auf der bisher veröffentlichten Literatur sind bei langen Reaktionszeiten und hohen Fehlerraten langsame EEG-Frequenzen zu erwarten.

Die Pupillographie, deren Validität und Reliabilität bereits überprüft wurde, hat sich bereits im klinischen Alltag etabliert, wurde aber erst in wenigen Studien auf hirnelektrische Korrelate untersucht. Regen et al. untersuchten in 2013 „die Assoziation zwischen Pupillenunruheindex (PUI) und Wach-EEG bei gesunden Erwachsenen unter Schlafentzug“ (Regen et al. 2013). Die Ergebnisse zeigten eine signifikante, positive Korrelation der Delta-, Theta-, und Alpha-Aktivität mit dem PUI – diese sollen in der vorliegenden Arbeit überprüft werden.

Viele Studien zu EEG-Korrelaten bei Aufmerksamkeitstests finden unter Schlafentzug statt. Oftmals werden genaue Schlaf- und Wachzeiten festgelegt. Inwiefern sich der Proband allerdings auch im Wachzustand erholt oder inwiefern die Schlafphasen von Qualität sind bleibt dabei offen. Anhand einer EEG-Aufzeichnung vor der Nacht der Testung könnte man hierüber jedoch genauere Aussagen tätigen. Sprechen langsame Delta- und Theta-Aktivität in der Nacht für Erholung? Und ergeben sich hieraus wachere, zentralnervös aktivierte Aufmerksamkeitsgrade während der Testung am nächsten Morgen?

Des Weiteren bleibt die Frage nach der Beeinflussbarkeit der Testleistungen durch eine hohe Motivation des Probanden offen. Kann der Proband trotz größter Schläfrigkeit seine Aufmerksamkeit steigern und inwiefern lassen sich Motivationskorrelate in EEG-Aufzeichnungen wiederfinden?

### **Genaue Fragestellung/Hypothesen**

**1. Welche Zusammenhänge lassen sich zwischen den Testergebnissen des VigiMar und des PST und der hirnelektrischen Aktivität während der Testungen feststellen?**

**a)** Gehen vermehrte Beta- und Gamma-Aktivitäten im EEG mit besseren Testergebnissen einher?

**b)** Gehen vermehrte Alpha-, Delta- und Theta-Aktivitäten im EEG mit schlechteren Testergebnissen einher?

**2. Gibt es einen Zusammenhang zwischen der nächtlichen elektrischen Hirnaktivität (in der Nacht vor der Vigilanztestung) und den Testergebnissen am nächsten Morgen? Geht ein hohes Ausmaß von Theta- und Delta-Aktivität während der Nacht mit besseren Testergebnissen am nächsten Morgen einher?**

**3. Gibt es einen Zusammenhang zwischen der nächtlichen Hirnaktivität (in der Nacht vor der Vigilanztestung) und der elektrischen Hirnaktivität am nächsten Morgen während der Vigilanztestung? Geht ein hohes Ausmaß von Theta- und Delta-Aktivität während der**

**Nacht mit verminderter Theta- und Delta-Aktivität während der Vigilanztestung einher?**

**4. Welche Rolle spielt die Motivation? Lassen sich bei Probanden unter Belohnungsaussicht vermehrte Alpha- und Beta-Aktivität und verminderte Theta- und Delta-Aktivität während der Testung hirn-elektrisch messen?**

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Studiendesign**

In dem Zeitraum von Oktober 2012 bis September 2013 wurden 20 gesunde Probanden nach moderatem Schlafentzug während der Durchführung zweier Vigilanztests, dem VigiMar und dem pupillographischen Schläfrigkeitstest, auf elektroenzephalographische Korrelate unter moderatem Schlafentzug untersucht. Gleichzeitig wird der Aspekt der Motivation berücksichtigt, der die Grundlage für zwei weitere Dissertationen darstellt. Jeder Proband wird an einem Testtag unter der Testbedingung „Belohnung“ getestet. Hierbei kann er, je nach Leistung im Vergleich zu den anderen Probanden bis zu 400 Euro gewinnen. An dem anderen Testtag werden die Probanden unter der Testbedingung „Teilnahme“ getestet. Hierbei erfolgt eine pauschale Vergütung unabhängig der Testergebnisse. Die Probanden werden aus dem Kollektiv der studentischen Mitarbeiter des Schlafmedizinischen Zentrums des Universitätsklinikums Marburg rekrutiert und müssen folgende Einschluss- und Ausschlusskriterien erfüllen.

#### **2.1.1. Ein- und Ausschlusskriterien**

Im Ethikantrag des Projekts wurden folgende Kriterien festgehalten:

Einschlusskriterien für die Auswahl der Probanden:

- Tätigkeit als studentische Hilfskraft in der nächtlichen Überwachung des Schlafmedizinischen Zentrums.
- Einwilligung zur Teilnahme an diesem Projekt.

Ausschlusskriterien:

- Widerruf der Einwilligung zur Studienteilnahme.
- Verdacht auf das Vorliegen einer schlafmedizinischen Erkrankung, die die Vigilanz deutlich beeinflusst (obstruktive Schlafapnoe, Narkolepsie, idiopathische Hypersomnie usw.).

- Vorliegen einer das Tagesbefinden und die Wachheit deutlich beeinträchtigenden Erkrankung (z.B. schwerer Infekt).
- Vorliegen einer Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS)
- Vorliegen einer Arbeitsgedächtnisstörung

### **2.1.2. Ablauf der Studie**

Mit den rekrutierten Probanden wird im Vorfeld ein Vortestungstermin vereinbart. Die Probanden werden ausführlich über die Studie informiert und erhalten eine Probandeninformation in schriftlicher Form. Falls sie sich zur Studienteilnahme bereit erklären, durchlaufen die Probanden nach Unterschreiben der Einverständniserklärung einen Testdurchlauf beider Vigilanztests, dem VigiMar und dem PST. Dies ist erforderlich um die Probanden bereits vor den eigentlichen Testungen mit den Testbedingungen vertraut zu machen. Außerdem sollen im Rahmen der Vortests individuelle Referenz- und Vergleichswerte vor dem eigentlichen Start der Messungen ermittelt werden.

Um vigilanzmindernde Erkrankungen oder gravierende Schlafstörungen auszuschließen zu können, füllen die Probanden vor Beginn der Testung die Epworth Sleepiness Scale (ESS) aus und werden anhand des Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) bezüglich Ihres Schlafverhaltens eingeschätzt. Eine weiterführende Anamnese zu weiteren beeinträchtigenden Erkrankungen wird durch die Versuchsleiter durchgeführt (siehe Ein- und Ausschlusskriterien).

Um die aktuelle Vigilanzlage des Probanden einzuschätzen, werden jedes Mal vor dem VigiMar und vor dem PST visuelle Analogskalen ausgefüllt. Hierbei werden die Motivation (VAS-M), die Selbsteinschätzung der Probanden bezüglich ihrer Testergebnisse (VAS-E) und die Selbsteinschätzung zur Leistung (VAS-L) auf Skalen messbar gemacht. Die Probanden werden für den Vortestungstermin mit 25 Euro vergütet.

Nach dem Vortestungstermin, werden mit den Probanden 2 Termine für die eigentlichen Testungen vereinbart. Außerdem erhalten sie einen Vordruck, auf dem sie jeweils eine Woche vor den Testungen ihren Schlaf protokollieren.



Die beiden eigentlichen Testungen finden während und nach der Arbeitszeit der studentischen Hilfskräfte des Schlaflabors statt.

Von 19:45 bis 7:45 Uhr sind die Probanden mit ihrer Tätigkeit als Hilfskraft beschäftigt und werden bis spätestens 22:00 Uhr mit einem tragbaren Polysomnographiegerät der Firma Weinmann versorgt. Mit dem Polysomnographiegerät wird ein EOG, ein Kinn-EMG und ein EEG, entsprechend der Leitlinien der AASM (Das AASM-Manual zum Scoring von Schlaf und assoziierten Ereignissen 2013) von ca. 22.00 bis 7:00 Uhr aufgezeichnet und am nächsten Morgen durch die Versuchsleiter ausgelesen.

Die Tätigkeit der studentischen Hilfskräfte besteht aus der Versorgung von etwa 12 Patienten. Am Abend werden den Patienten polysomnographische Messfühler angelegt und während der Nacht werden die Aufzeichnungen überwacht. Ab 5:30 Uhr werden die Messfühler entfernt. Mögliche Ruhezeiten während der Arbeitsnacht werden von den Probanden im Schlafprotokoll dokumentiert. Den studentischen Hilfskräften steht es frei, sich während der Arbeitsnacht, nach Absprache mit den anderen Hilfskräften, für eine Zeit schlafen zu legen. In der Regel kommen die Probanden in der Arbeitsnacht so zu 1-3 Stunden Schlaf. Es handelt sich also um partiellen Schlafentzug.

Weiterhin wird sichergestellt, dass sowohl während der Arbeitsnacht, als auch vor den Testungen, keine wach machenden Substanzen wie Kaffee, Cola, Tee, oder Ähnliches konsumiert wird.

Am nächsten Morgen, vor dem Start der Testungen, schätzen die Probanden ihre Schläfrigkeit anhand der Stanford-Schläfrigkeits-Skala (SSS) ein. Anschließend werden mittels Briefumschlag die Testbedingungen gelöst. Die Probanden können entweder unter „Teilnahmevergütung“ oder unter „Belohnungsaussicht“ getestet werden. Während bei der Bedingung „Teilnahmevergütung“ lediglich 25 Euro pauschal an die Probanden ausgezahlt werden, können die Probanden bei der Bedingung „Belohnungsaussicht“ je nach Testleistung im Vergleich zu den anderen Probanden gestaffelt 200 Euro, 100 Euro, 70 Euro, 50 Euro, usw. erhalten. Es handelt sich also um einen monetären Belohnungsanreiz.

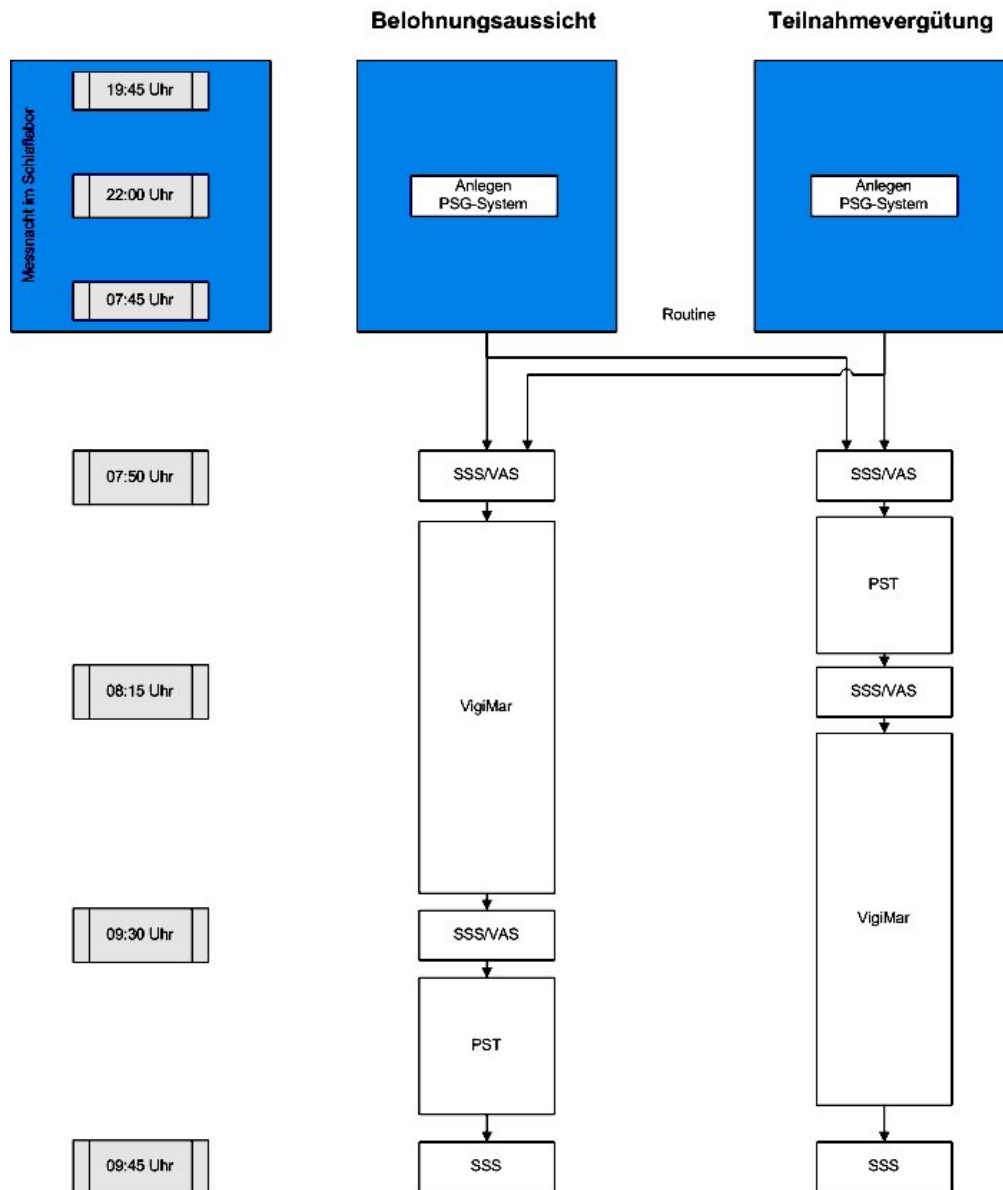
Nach dem Losverfahren werden die Probanden erneut mit dem tragbaren Polysomnographiegerät versorgt. Während der beiden folgenden Vigilanztestungen

werden EOG, Kinn-EMG, und EEG aufgezeichnet, sodass eine synchrone Auswertung der Testergebnisse und der EEG-Aufzeichnung möglich ist. Vor jedem Test erfolgt, wie bei der Voruntersuchung die persönliche Einschätzung anhand der visuellen Analogskalen VAS-M, VAS-E und VAS-L. Unter Belohnungsaussicht wird zusätzlich durch die visuelle Analogskala

VAS-V die persönliche Verlockung durch den möglichen Gewinn abgefragt. Die beiden Vigilanztests werden an den beiden Untersuchungstagen in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt. Nach den beiden Tests wird erneut die Schläfrigkeit anhand des SSS eingeschätzt, die Elektroden des Polysomnographiegerätes werden entfernt und die Probanden können nach Hause gehen.

Insgesamt ist für die Probanden mit einem Zeitaufwand von etwa 7 Stunden zu rechnen (Vortestungstag, 1. Testungstag, 2. Testungstag). Anhand des folgenden Schemas lässt sich die Durchführung der Studie nachvollziehen.

**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau der Studiendurchführung (entnommen aus dem Ethikantrag des Projekts)

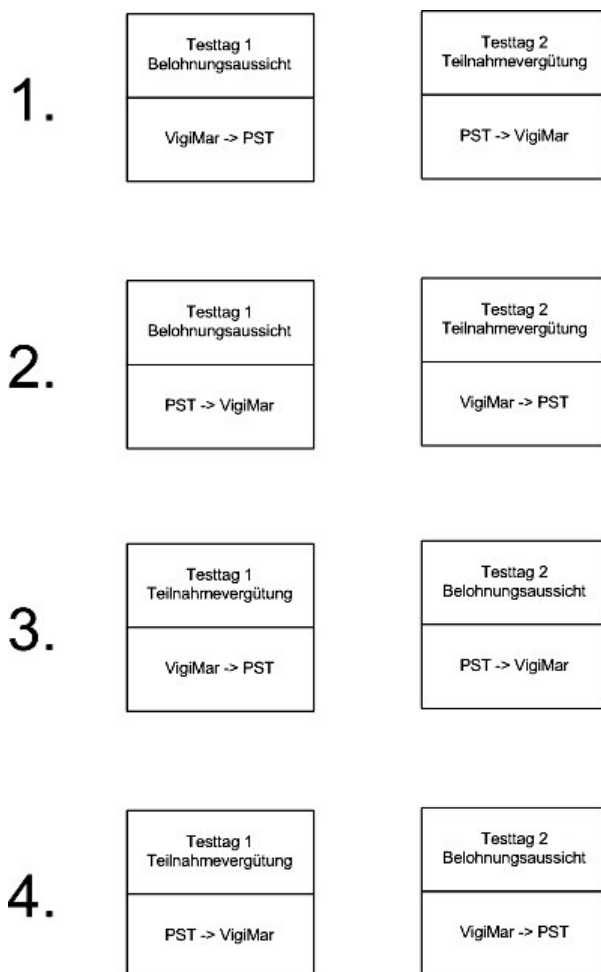


Die Hälfte der Probanden bekommt am ersten Testtag die Bedingung „Teilnahmevergütung“ zugeteilt, die andere Hälfte wird unter der Bedingung „Belohnungsaussicht“ getestet. Am zweiten Tag wird die noch ausstehende Bedingung zugelost, sodass jeder Proband einmal unter Teilnahmevergütung und einmal unter Belohnungsaussicht getestet wird. Die Probanden sollen möglichst lang in dem Glauben gelassen werden, per Zufall und Los zu einer der Bedingungen zu gelangen. Hierdurch wird vermieden, dass sich die Probanden in den Nächten vor der zugesicherten Belohnungsaussicht besonders ausruhen, um wach für

den Test zu sein. Die Probanden gehen also davon aus, dass an beiden Testtagen die Bedingungen zufällig ausgelost werden.

Aus dem folgenden Versuchsaufbau ergeben sich vier verschiedene Möglichkeiten der Abfolge.

**Abbildung 3:** Zusammenstellung der sich aus Untersuchungsbedingung (Teilnahmevergütung oder Belohnungsaussicht) und Reihenfolge der Vigilanzuntersuchungen (PST und VigiMar) ergebenden vier Untersuchungssequenzen.



Für die später durchzuführende statistische Auswertung müssen mindestens 20 Probanden getestet werden. Die Probandenanzahl ist somit ein Vielfaches von 4. Dies ist notwendig, damit alle 4 oben gezeigten Abläufe gleich oft vertreten sind. Die Zuordnung der Probanden zu den vier verschiedenen Gruppen erfolgt durch Randomisierung und wird durch Mitarbeiter der AG Studienplanung und Biometrie des schlafmedizinischen Zentrums durchgeführt.

### 2.2. Der VigiMar

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist der computergestützte VigiMar ein einfacher „Vierfach-Wahl-Reaktionszeittest“, der von einer langen Zeitdauer und einer niedrigen Reizfrequenz charakterisiert ist. Über 90 Minuten hinweg testet er das Vermögen Daueraufmerksamkeit sowie Vigilanz unter monotonen Bedingungen aufrecht zu erhalten.

#### 2.2.1. Testaufbau

Während des 90 minütigen Tests beobachtet der Proband 4 Rauten (links oben, rechts oben, links unten, rechts unten) auf einem Computerbildschirm. In einem randomisierten Zeitintervall von 10-50 Sekunden (s) wird ebenfalls zufällig eine der vier Rauten ausgeblendet. Der Proband muss so schnell wie möglich reagieren und auf einer handlichen Tastatur unter vier korrespondierenden Tasten die richtige, dazugehörige Taste wählen und betätigen. Bei korrekter Zuordnung erscheint die Raute wieder auf dem Bildschirm. Falls der Proband länger als 10 Sekunden zum Drücken der richtigen Taste benötigt, ertönt ein Signalton und die Raute erscheint ohne Tastendruck erneut auf dem Bildschirm.

**Abbildung 4:** Bildschirmanzeige und Tastatur VigiMar (Cassel et al. 2011)



Ein eventuell eingeschlafener Proband sollte in der Regel von dem Signalton geweckt werden. Falsche Zuordnungen der Tasten zu den jeweils verschwindenden Rauten, werden dem Probanden ebenfalls mit einem Geräusch signalisiert. Um dennoch auftretende Schlafphasen zu vermeiden, wird der Proband mittels Videokamera von dem Versuchsleiter beobachtet und falls nötig wieder geweckt.

### 2.2.2. Vorbereitung und Testdurchführung

Der VigiMar findet in einem kleinen, ruhigen, leicht abgedunkelten (Lichtstärke 5-20 Lux) Raum statt. Es wird sichergestellt, dass der Proband während der Testdurchführung ungestört bleibt. Eventuell ablenkende Gegenstände sowie Uhren, Handys usw. werden aus dem Testungsraum entfernt. Der Proband nimmt in bequemer Sitzhaltung auf einem Entspannungsstuhl Platz. Der Versuchsleiter gibt in dem Programm „VigiMar 2“ den anonymisierten Probanden-code ein und startet die automatisierte Instruktion:

*Der Vigilanztest, der nun durchgeführt wird, dient dazu, ihre Reaktionsbereitschaft in monotonen Situationen zu erfassen. Sie werden dazu in eine sehr langweilige Situation versetzt, in der Ihre einzige Aufgabe ist, auf das Verschwinden einer von vier auf diesem Bildschirm gezeigten Rauten schnell und richtig, d.h. durch Druck auf den entsprechenden Knopf auf der Tastatur in Ihrer Hand zu reagieren. Wenn z.B. die rechte untere Raute verschwindet, sollen Sie schnell auf die rechte untere Taste auf der Tastatur drücken. Die rechte untere Raute wird dann wieder erscheinen. Danach dauert es bis zu knapp einer Minute, bis wieder eine Raute verschwindet. Die Zeitabstände sind in diesem Bereich zufällig, und auch die Position der verschwindenden Raute ist zufällig. Es lohnt also nicht, nach einem „Rhythmus“ oder „Muster“ zu suchen. Falls Sie es versäumen, auf eine Taste zu drücken, ertönt nach etwa 10 Sekunden ein Warnton und die Raute erscheint von selbst wieder. Der gleiche Warnton ertönt sofort, wenn Sie eine falsche Taste drücken.*

*Der gesamte Vigilanztest dauert etwa 90 Minuten. Es wird während dieser Zeit wahrscheinlich recht langweilig für Sie werden. Sie sollten sich trotzdem bemühen, den Test bis zum Ende konzentriert zu bearbeiten, da gemessen werden soll, wie gut Sie es schaffen, sich in sehr langweiligen Situationen zu konzentrieren. Während der 90 Minuten sollten Sie möglichst ruhig und bequem sitzen bleiben. Falls Ihre Sitzposition unbequem ist, Sie durch irgendetwas (Geräusche, Temperatur) gestört werden, oder Sie z.B. vor Testbeginn noch einmal die Toilette aufsuchen möchten, sollten Sie sich bei unserem Personal melden. Bitte legen Sie Ihre Uhr während des Testes ab, sodass sie nicht mehr im Blickfeld ist. Falls Sie noch Fragen haben stellen Sie diese bitte jetzt.*

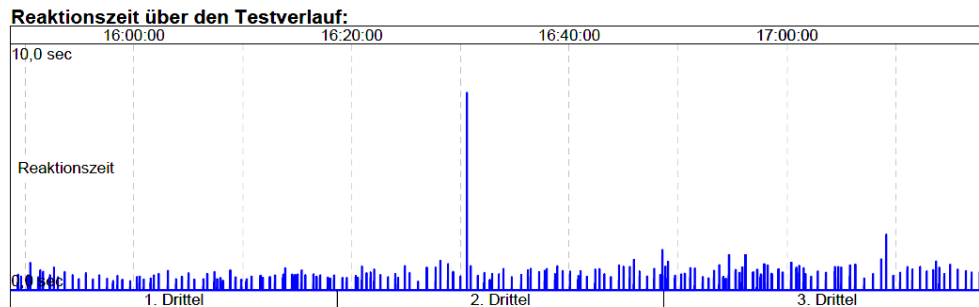
Nachdem der Proband die Instruktion aufmerksam gelesen und bestätigt hat, dass er sie verstanden hat, startet der Versuchsleiter einen kurzen Probetest. Es wird sichergestellt, dass der Proband alle Anweisungen richtig durchführt. Anschließend wird der 90 minütige, videoüberwachte Test gestartet.

### **2.2.3. Datenauswertung**

Nach Testende werden die Testergebnisse als EDF-Datei gespeichert. Diese Datei kann problemlos mit einer polysomnographischen Aufzeichnungsdatei zusammengefügt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit ein Ergebnisdokument im PDF-Format zu erstellen und dieses auszudrucken.

**Abbildung 5:** Beispiel eines Auswertungsausdrucks des VigiMar

Test:	VIGIMAR, Dauer 90 min (10-50 sec)			
Beginn:	31.10.12 um 15:48:41 Uhr			
Ende:	31.10.12 um 17:18:41 Uhr			
	Anzahl Ereignisse:	175	Reaktionen:	188
			- mit Ereignisbezug:	175
			- ohne Ereignisbezug:	13



Typ	Drittel	Anz.	%	MRZ	STD	MIN	MAX
Richtige	1	57	95,00	0,60	0,14	0,38	1,11
	2	55	98,21	0,90	1,00	0,36	8,02
	3	59	100,00	0,86	0,28	0,47	2,26
Falsche	1	3	5,00	0,44	0,02	0,42	0,45
	2	1	1,79	0,50	--	0,50	0,50
	3	0	0,00	--	--	--	--
Versäumte	1	0	0,00	--	--	--	--
	2	0	0,00	--	--	--	--
	3	0	0,00	--	--	--	--
<b>Gesamt:</b>							
Richtige	1-3	171	97,71	0,79	0,61	0,36	8,02
Falsche	1-3	4	2,29	0,45	0,03	0,42	0,50
Versäumte	1-3	0	0,00	--	--	--	--
<b>Mittlere Reaktionszeit</b>							
	1	60		0,59	0,14	0,38	1,11
	2	56		0,89	1,00	0,36	8,02
	3	59		0,86	0,28	0,47	2,26
	1-3	175		0,78	0,60	0,36	8,02

Der Reaktionszeitverlauf liefert bereits visuell einen ersten Eindruck über den Testverlauf (siehe Abbildung 5). Gravierende Leistungsverlechterungen fallen also bereits anhand der Graphik auf. Der VigiMar wird hierbei in 30 minütigen Dritteln beobachtet. Je nach Reaktionsqualität (Richtige, Falsche, Versäumte) wird die mittlere Reaktionszeit, die Standardabweichung sowie minimale und maximale Reaktionszeit der einzelnen Drittel angegeben. Unterschiedliche Ergebnisse in den einzelnen Dritteln, d.h. im Zeitverlauf, weisen z.B. auf einen Lernerfolg oder nachlassende Leistungen hin.



## 2.2.4. Ergebnisbewertung

Bisher liegt keine Normierung des VigiMar nach Alter oder Geschlecht vor. Zur klinischen Anwendung eignet sich folgendes Auswertungsmuster:

*Mittlere Reaktionszeit  $\geq 1,5$  Sekunden und/oder  $\geq 5$  versäumte Ereignisse und/oder über die Testdrittel deutlich länger werdende Reaktionszeiten = Hinweis auf beeinträchtigte Vigilanz (Cassel et al. 2011)*

## 2.3. Der Pupillographische Schläfrigkeitstest

Zur Messung des Pupillenverhaltens bei Schläfrigkeit dient der seit 1997 von der Firma AMTech in Dossenheim lizenzierte Pupillographische Schläfrigkeitstest.

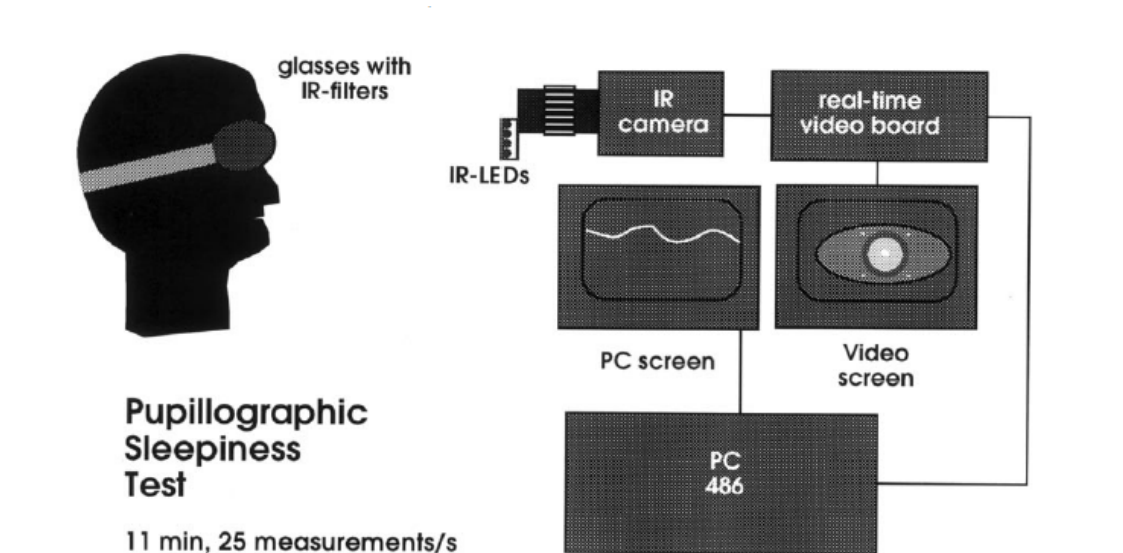
### 2.3.1. Testaufbau

Während des Tests sitzt der Proband möglichst bequem auf einem größenverstellbaren Stuhl vor einem Messtisch. Der Kopf wird mit Hilfe einer Stirn- und Kinnstütze fixiert, die Arme werden locker auf den Messtisch abgelegt. Zur Lichtabschirmung wird der Raum abgedunkelt und außerdem trägt der Proband eine Infrarotbrille, um restliche Lichtquellen wie z.B. den PC-Monitor auszuschalten. Am anderen Ende des Messtisches, etwa 0,8 m entfernt, befinden sich eine höhenverstellbare Infrarotkamera, die entweder die rechte oder die linke Pupille detektiert sowie eine Lichtquelle in Form einer Einzel-IR-Diode, die der Proband mit seinen Augen fixieren soll. Die Pupillographie arbeitet mit einer Messfrequenz von 25 Hz und einer räumlichen Auflösung von 0,05mm.

Die Messvorrichtung ist mit einem Computer verbunden und wird über das Programm winPST der Firma AMTech gesteuert. Die Aufzeichnungen der Infrarotkamera werden auf den Computer übertragen und mit dem Programm winPST ausgewertet. Während der Messung werden die Aufzeichnungen der IR-Kamera auf dem Computerbildschirm beobachtet (Wilhelm 2006).

Anhand der folgenden Abbildung lässt sich das Messsystem nachvollziehen (Lüdtke et al. 1998).

**Abbildung 6:** Testaufbau des PST



### 2.3.2. Die Detektion der Pupille

Die Leuchtdiode erscheint mit einem hellen Reflex auf der Cornea. Das Licht der Leuchtdiode wird durch die Cornea fast vollständig reflektiert. Hierdurch erscheint die Pupille bei ausreichendem Pupillendurchmesser heller als die Iris. Der hellste dieser Reflexe, der erste sogenannte Purkinjereflex, dient als Fixpunkt zur Pupillenrandbestimmung in horizontaler und vertikaler Richtung. Mit Hilfe des von der Software durchgeführten, sogenannten Kreisfitverfahrens, ein Verfahren aus der analytischen Geometrie, erhält man trotz partiellem Lidchluss oder nicht exakt mittig liegendem Purkinjereflex zuverlässige Messparameter (Wilhelm 2006).

### 2.3.3. Vorbereitung und Testdurchführung

Der Versuchsleiter sorgt für eine ruhige Testatmosphäre und überprüft die Sitzhaltung des Probanden. Die Infrarotbrille sollte fest anliegen, bequem sitzen

und kein Störlicht durchlassen. Während sich der Proband an die Sitzposition gewöhnt und probeweise die Leuchtdiode mit den Augen fixiert, gibt der Versuchsleiter den anonymisierten Probandencode ein. Hiernach wird der Proband, angelehnt an folgende Vorgabe, instruiert:

*Die Messung dauert 11 Minuten. Während der Messung wird es im Raum dunkel und ruhig sein. Wir werden erst nach Messende wieder mit Ihnen sprechen. Schauen Sie bitte in Richtung des roten Lichts, Sie brauchen es aber nicht scharf zu sehen. Sie sollten nicht Kopfrechnen oder gedankliche Probleme lösen, sondern einfach entspannt nach vorne schauen. Wir stellen jetzt die Kamera ein und sagen Ihnen, wenn die Messung beginnt (Wilhelm 2006).*

Während der Messung sollten keine längeren Schlafphasen auftreten. Gegebenenfalls muss der Proband durch den Versuchsleiter geweckt werden. Allerdings sollte eine spontane Lidöffnung hierbei möglichst abgewartet werden und nicht zu früh in den Messprozess eingegriffen werden.

### **2.3.4. Datenauswertung und Ergebnisprotokoll**

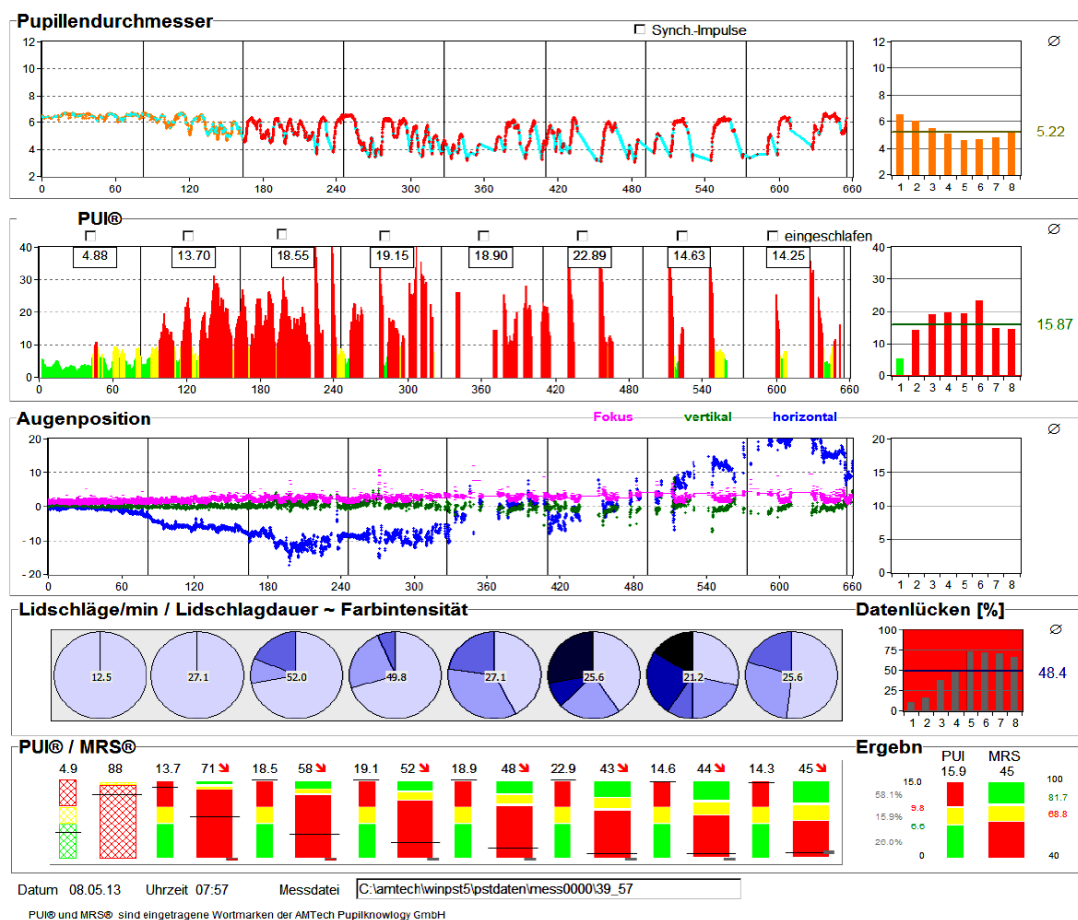
Die Pupillographie liefert als wichtige Messparameter den Pupillenunruheindex (PUI), den Monotonie Resistenz Status (MRS), Durchschnittswerte des Pupillendurchmessers und Angaben zur Blinzelfrequenz.

Der 11-minütige PST ist zur Auswertung in 8 Zeitfenster à 82 Sekunden unterteilt. Der mittlere Pupillendurchmesser wird für jedes Fenster (82 s) berechnet, mit dem mittleren Pupillendurchmesser der Gesamtzeit verglichen und im Zeitverlauf dargestellt. Der PUI spiegelt die Tendenz zur Oszillation und sogenannten Fatigue Waves der Pupille wieder. Dieser Parameter ergibt sich aus der absoluten, kumulativen Summe der Veränderung des Pupillendurchmessers und basiert auf einer Sample Frequenz von 1.5626 Hz (= 25 Hz/16) (Lüdtke et al. 1998).

Der MRS ist ein relativ neuer Parameter, der schon während der Messung eine Ergebnisprognose zulässt, und so eine verkürzte Messzeit ermöglichen kann (AMTech Pupilknowlogy GmbH). Das Programm winPST nimmt eine automati-

sche Bewertung des PUI vor. Ausgehend von der Normierungsstudie von Wilhelm et al., bei der man zu einem mittleren PUI von 4,5 (mm/min) gelangt (Wilhelm et al. 2001), werden die Ergebnisse als „normal“, „kontrollbedürftig“ und „pathologisch“ eingeteilt. Im Ergebnisprotokoll erkennt man diese Einteilung anhand der Farben grün – für normal, gelb – für kontrollbedürftig, und rot – für pathologisch. Der PUI gilt auch als pathologisch, falls der Proband eingeschlafen ist.

Abbildung 7: Beispiel für ein Ergebnisprotokoll des PST



## 2.4. Die Polysomnographie

Sowohl während der Arbeitsnacht, als auch im Laufe der Vigilanztestungen am nächsten Morgen, tragen die Probanden ein tragbares Polysomnographiegerät „SOMNOcheck 2 R&K“ der Firma Weinmann GmbH & Co, Hamburg. Die Si-

gnale werden mit einer Samplingrate von 256 Hz und einer Auflösung von 12 Bit digital aufgezeichnet.

Anhand der AASM-Leitlinie werden am Abend vor den Testtagen gegen 21.30 Uhr Goldnapfelektroden zur Erfassung des EOG, des Kinn-EMG, und der EEG-Ableitungen C3, F4, und O2 mit den Ohrelektroden A1/A2 und Cz als Referenz nach dem 10/20 System angelegt. Das ambulante Polysomnographiegerät wird per USB-Kabel an den Computer angeschlossen und mit der SOMNOlab-Software gesteuert. Nach Prüfung der Impedanzen am Computer findet die Aufzeichnung der Signale offline statt. Die Impedanzen dürfen hierbei 10 k $\Omega$  nicht überschreiten. Am nächsten Morgen werden die Aufzeichnungen der Nacht per USB-Kabel ausgelesen und als lab-Datei gespeichert. Nach wiederholter Prüfung der Impedanzen wird erneut eine Aufzeichnung gestartet, die bis zum Ende der Vigilanztests andauert und ebenfalls als lab-Datei gespeichert wird.

### **2.5. Die Auswertung der EEG – Aufzeichnungen**

Die Polysomnographien der Nacht werden visuell, computerbasiert durch Medizinisch Technische Assistent/en/innen des Schlafmedizinischen Zentrums Marburg durchgeführt. Als Auswertungsprogramm dient die SOMNOlab-Software. Die meist nur kurzen Schlafphasen der Probanden werden anhand der im Kapitel 1.4.1 beschriebenen Kriterien der AASM (American Academy of Sleep Medicine (Das AASM-Manual zum Scoring von Schlaf und assoziierten Ereignissen 2007) ausgewertet.

Des Weiteren wird die Summe der Power der verschiedenen Frequenzbereiche während der Nacht berechnet.

Zur Auswertung der Aufzeichnungen während der Vigilanztests werden ebenfalls die relative, die absolute Power und die „Total Power“ der verschiedenen Frequenzbereiche berechnet.

#### **2.5.1. Die EEG-Poweranalyse**

Eine umfassende Literaturrecherche ergab, dass fünf verschiedene Frequenzbänder, die Hoch- und Tiefpassfilter, das FFT-Fenster, und die Samplingrate definiert werden. Der folgenden Tabelle kann man die unterschiedlichen Ver-

fahrensweisen einer Auswahl von Autoren entnehmen. Es handelt sich hierbei um das Ergebnis einer gewissenhaften Literaturrecherche basierend auf den Inhalten der Datenbank PubMed. Die Tabelle bleibt aufgrund fehlender Angaben der Autoren unvollständig.

**Tabelle 3:** Parameter der EEG-Analyse unterschiedlicher Veröffentlichungen

Frequenzbanden	Delta	theta	alpha	beta	Gamma
Bearden 2004	k.A.	4,0 - 7,5	0 - 10,0 / 10,5 - 12	13,0 - 21,0 21,5 - 32,0	k.A.
Belyavin 1986	1,0 - 3,0	4,0 - 7,0	8,0 - 13,0	14,0 - 21,0 22,0 - 30,0	k.A.
Caldwell 2002	1,5 - 3,0	3,0 - 8,0	8,0 - 13,0	13,0 - 20,0	k.A.
Corsi-Barera 1996	k.A.	4,0 - 7,5	,5 - 9,5 / 10,0 - 12,	13,0 - 20,0	k.A.
Cote 2003	k.A.	4,0 - 8,0	8,0-10 / 10,0-12,0	k.A.	k.A.
Gevins 1997	k.A.	4,0 - 7,5	7,5-14,0	k.A.	k.A.
Hoedlmoser 2010	1,0 - 4,0	4,0 - 8,0	8,0-12,0	k.A.	k.A.
Lorenzo 1995	1,5 - 3,5	4,0 - 7,5	7,5 - 9,5 10,0 / 12,5	13,0 - 17,5 18,0 - 25,0	k.A.
Enzyklopädie	0,5 - 3,5	4 - 7,5	8,0 - 12,0	13,0 - < 30,0	k.A.
Neuro-Richtlinien	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
AASM	0,0 - 4,0	4,0 - 7,0	8,0 - 13,0	13,0 - 30,0	k.A.
Regen 2013	1,5 - 5,5	5,5 - 8,5	5 - 10,5 / 10,5 - 12	12,0 - 18,0 18,0 - 21,0 21,0 - 30,0	k.A. k.A. k.A.
Wir	0,0 - < 4	4,0 - < 8	8,0 - <13,0	13,0 - < 30,0	30,0 - < 70

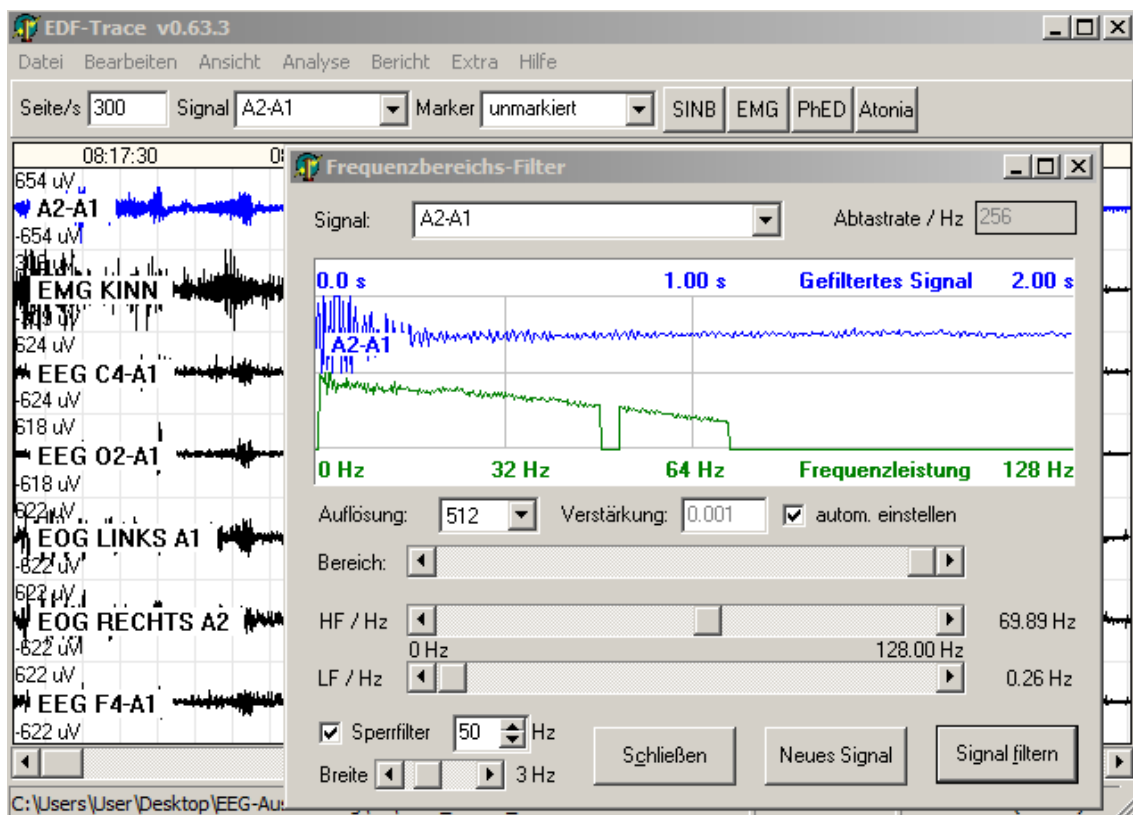
	Hochpassfilter	Tiefpassfilter	FFT Fenster	Samplingrate (Hz)	Notchfilter
Bearden 2004	0,5	32	k.A.	128	k.A.
Belyavin 1986	0,5	32	Kosinus-Fenster	128	k.A.
Caldwell 2002	0,53	70	Hamming-Fenster	200	k.A.
Corsi-Barera 1996		35	Rechteck-Fenster	128	k.A.
Cote 2003	0,5	70	Hanning-Fenster	200	k.A.
Gevins 1997	0,05	100	Hanning-Fenster	512	k.A.
Hoedlmoser 2010	0,1	70	nicht angegeben	500	ja
Lorenzo 1995	1	35	Rechteck-Fenster	128	k.A.
Makeig 1995	0,1	100	Hanning-Fenster	312,5	k.A.
Smith 2002	0,01	100	Hanning-Fenster	512	k.A.
Neuro-Richtlinien	0,5	70	k.A.	k.A	ja
AASM	0,3	35/70	k.A.	>200	ja
Regen 2013	0,3	50	k.A.	150	k.A.
Wir	0,3	70	Hanning-Fenster	256	ja

Die EEG-Analyse erfolgt mit dem Programm EDFTrace. Mit diesem Programm ist es möglich, EEG-Aufzeichnungen auf dem Bildschirm anzuschauen, zu fil-

tern und die Power einzelner Frequenzbänder zu berechnen. Die Aufzeichnungsdateien werden deshalb von der ursprünglichen lab-Datei in eine rec-Datei umgewandelt. Die EEG-Signale werden mit einem Hochpassfilter von 0,3 Hz und einem Tiefpassfilter von 70 Hz gefiltert. Zusätzlich werden die Signale mit einem Notchfilter (50 Hz-Filter) gefiltert.

Anhand der nächsten Abbildung kann man diesen Vorgang nachvollziehen. Aufgrund der gegebenen Samplingrate von 256 Hz ergeben sich die Filtergrenzen 0,26 Hz und 69,86 Hz.

**Abbildung 8:** Filtern der einzelnen EEG-Spuren



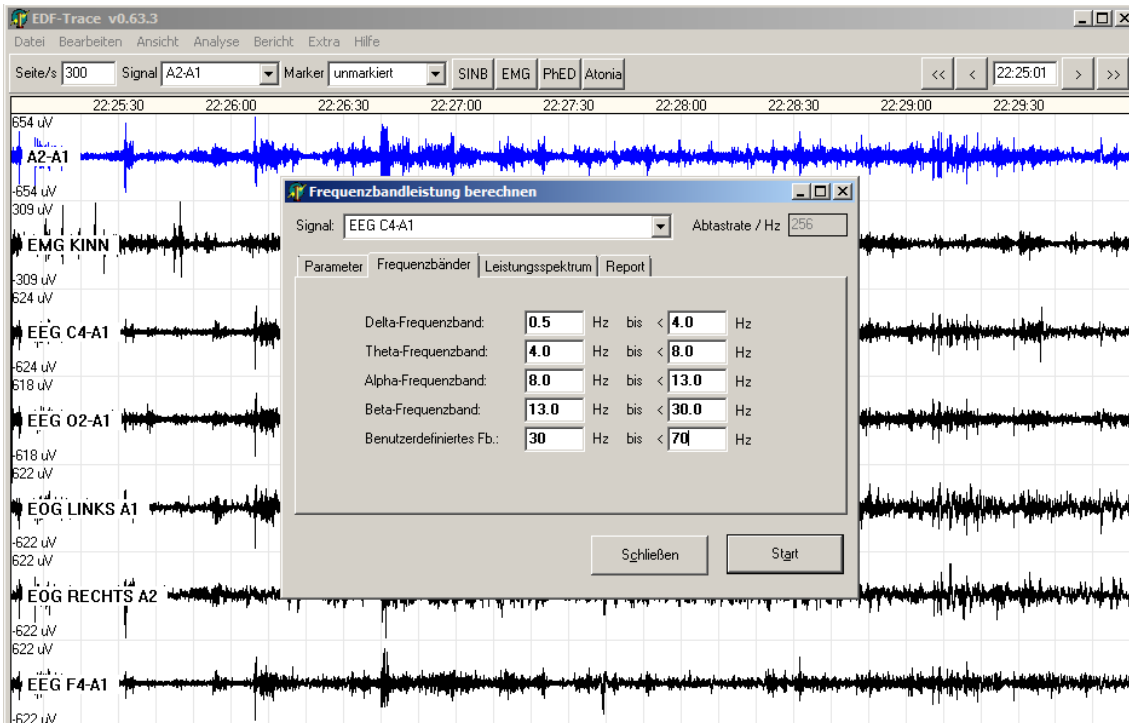
Nach dem Filtern der Signale kann die Berechnung der absoluten und relativen Power der einzelnen EEG-Signale (C3, F4, O2) vorgenommen werden.

Bei der nächtlichen EEG-Aufzeichnung handelt es sich um eine Zeitspanne von 8 Stunden (23.00 Uhr – 7.00 Uhr). Bei den testsynchronen Aufzeichnungen handelt es sich um 90 min während des VigiMars und 11 Minuten während des PSTs.

Es wird die relative und absolute Power innerhalb der verschiedenen Frequenzbänder berechnet: Delta (0,5 – 4,0 Hz), Theta (4,0 – 8,0 Hz), Alpha (8,0 – 13

Hz), Beta (13 – 30 Hz) und Gamma (30 – 70 Hz). Außerdem erhält man die Total Power der einzelnen Bänder. Anhand der Abbildung 9 kann man den Vorgang der Power-Berechnung nachvollziehen.

**Abbildung 9:** Berechnung der EEG-Band-Power



## 2.6. Statistische Methoden

Alle erhobenen Daten wurden unter Verwendung des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel in Dateien eingegeben bzw. aus der Software EDF-Trace in Excel-Dateien eingelesen.

Nach umfassender Qualitätskontrolle und Fehlerkorrektur wurde die statistische Berechnung mit dem Programm IBM SPSS Statistics Version 22 (IBM GmbH) durchgeführt.

Für alle in die Analysen aufgenommenen Variablen wurde eine Prüfung auf Normalverteilung mittels Kolmogorow-Smirnow-Test vorgenommen. Aufgrund der geringen Fallzahl von 20 Probanden wurde bereits bei  $p \leq 0,10$  von einer bedeutsamen Abweichung von der Normalverteilung ausgegangen und es wurden nichtparametrische Methoden sowohl für deskriptive, als auch inferenzstatistische Berechnungen verwendet. Bei der Beurteilung der Verteilung wurden deren Schiefe und Kurtosis ebenfalls berücksichtigt, wobei Werte  $> 2$  als Hin-



weis darauf gewertet wurden, dass die entsprechende Variable nicht ausreichend gut normalverteilt ist.

Die Prüfung auf Normalverteilung ergab für die überwältigende Mehrheit der Variablen eine Abweichung von der Normalverteilung. Daher und aufgrund der eher geringen Fallzahl sowie zugunsten besserer Lesbarkeit des umfangreichen Ergebnisteils wurde entschieden, alle inferenzstatistischen Berechnungen mit robusten nichtparametrischen Methoden durchzuführen. Zur Stichprobenbeschreibung wurden sowohl Mittelwert und Standardabweichung, als auch Median und 1. und 3. Quartil angegeben.

Zusammenhänge wurden mittels Spearman-Rho-Korrelationskoeffizienten (nachfolgend als „r“ bezeichnet) analysiert. Unterschiede (z.B. zwischen Belohnungs- und Teilnahmebedingungen) wurden mittels Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test auf statistische Bedeutsamkeit geprüft.

Als Grenze der Irrtumswahrscheinlichkeit wurde  $p \leq 0,05$  verwendet.

Wegen des explorativ orientierenden Charakters dieser Untersuchung, bei der mit einer eher geringen Fallzahl von  $n=20$  eine Vielzahl Variablen (Frequenzbänder x Bedingungen) untersucht werden, wurde keine Adjustierung der Irrtumswahrscheinlichkeit für multiples, nicht unabhängiges Testen vorgenommen. Die hier gefundenen bedeutsamen Zusammenhänge und Unterschiede dienen nicht dem Schluss auf die Grundgesamtheit, sondern sind lediglich als standardisierte Maße der innerhalb der Stichprobe gefundenen Effekte zu sehen. Sie sollten also in zukünftigen unabhängigen Untersuchungen gezielt geprüft werden, wobei die hier gewonnenen Ergebnisse dabei als Basis für statistisch fundierte Fallzahlschätzungen dienen können.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Stichprobenbeschreibungen

Insgesamt wurden, exklusive der Drop-Outs, 20 gesunde Probanden untersucht. Von initial 23 Probanden haben 3 Probanden die Untersuchungen von sich aus abgebrochen.

Zu Beginn der Studie waren die Teilnehmer zwischen 21 und 30 Jahren alt (Mittelwert  $25,05 \pm 2,89$ ). Der BMI betrug im Mittel  $21,99$  mit einer Standardabweichung von  $10,99$  insgesamt. Der kleinste BMI betrug  $17,92$ , der größte  $26,57$ . Alle Probanden waren Studenten der Humanmedizin an der Philipps-Universität Marburg und arbeiteten während der untersuchten Nächte als studentische Hilfskräfte im Schlafmedizinischen Zentrum des Universitätsklinikums Marburg. Im Mittel leisteten die Probanden  $2,9$  Nachtdienste im Monat.

**Tabelle 4:** Anthropometrische Daten und Häufigkeit der Nachtdienste der Probanden

	Mittelwert + SD	Median	Quartil 1	Quartil 3
Alter (Jahre)	$25,05 \pm 2,89$	24,00	22,25	28,01
Größe (m)	$177,30 \pm 6,89$	177,00	172,00	182,00
Gewicht (kg)	$69,40 \pm 10,99$	67,00	62,25	77,25
BMI	$21,99 \pm 2,52$	22,16	19,63	23,63
Nachtdienste pro Monat	$2,90 \pm 0,55$	3,00	3,00	3,00

Aufgrund technischer Probleme fielen bei einigen Probanden bestimmte EEG-Aufzeichnungen aus. Eine Übersicht hierüber zeigt Tabelle A1 im Anhang.

#### 3.2. Testergebnisse und hirnelektrische Aktivität während der Tests

Zu unterscheiden sind jeweils sowohl die absoluten und relativen Powerwerte, die Bedingung (Belohnung oder Teilnahme) und auch die Ableitungs-lokalisierung der Powerwerte über frontal, zentral und okzipital. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt immer beginnend mit den Werten unter Belohnungsbedingung, dann folgen die Werte unter Teilnahmebedingung. Hierbei werden zuerst die Ergebnisse für die absolute Power, dann die relative Power, in der Reihenfolge frontal, zentral und okzipital vorgestellt.

Bezüglich des VigiMars werden drei Parameter berücksichtigt: Die versäumten Ereignisse, die mittlere Reaktionszeit auf die Ereignisse und die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit.

Für den PST gelten die Ergebnisparameter Pupillenunruheindex und Monotonie-Resistenz-Status. Aufgrund der Vielzahl der Ergebnisse kann nicht auf alle Einzelergebnisse textlich Bezug genommen werden. Es werden meist statistisch bedeutsame Zusammenhänge, oder Zusammenhänge, die zwar Tendenzen aufzeigen, aber nicht statistisch signifikant werden dargestellt. Nicht bedeutsame Ergebnisse werden nicht immer textlich beschrieben, finden sich aber in den jeweiligen Tabellen.

### 3.2.1. Hirnelektrische Total-Power und Testergebnisse

Die frontale Total-Power korreliert unter Belohnung stark negativ mit den versäumten Ereignissen, der mittleren Reaktionszeit und der Standardabweichung während des VigiMars (Tabelle 5). Eine größere Total-Power frontal geht hier mit einer höheren Vigilanz während des VigiMars einher.

Unter Teilnahmebedingungen lassen sich diese Zusammenhänge nicht aufzeigen (Tabelle 6).

**Tabelle 5: Total-Power während des VigiMars unter Belohnungsbedingung**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, B = Belohnung)*

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
TotP_F4	r=	-0,716	-0,638	-0,742
	p=	0,001	0,004	< 0,001
TotP_C3	r=	-0,298	-0,187	-0,346
	p=	0,230	0,457	0,159
TotP_O2	r=	-0,247	-0,166	-0,186
	p=	0,323	0,509	0,460

**Tabelle 6: Total-Power während des VigiMars unter Teilnahmebedingung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
TotP_F4	r =	-0,233	-0,111	-0,242
	p =	0,336	0,652	0,318
TotP_C3	r =	-0,341	-0,202	-0,334
	p =	0,153	0,408	0,162
TotP_O2	r =	-0,223	-0,149	-0,314
	p =	0,359	0,542	0,190

Während des PSTs spricht eine hohe Total-Power unter Belohnungsbedingungen okzipital für einen statistisch bedeutsam, niedrigen Pupillen-unruheindex und einen hohen Monotonie-Resistenz-Status (Tabelle 7). Je höher die Total-Power okzipital, desto besser die Ergebnisse des PST.

Dies lässt sich unter Teilnahmebedingungen nicht zeigen (Tabelle 8).

**Tabelle 7: Total-Power während des PSTs unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruheindex	Monotonie Resistenz Status
TotP_F4	r =	-0,018	0,022
	p =	0,945	0,932
TotP_C3	r =	-0,220	0,217
	p =	0,381	0,386
TotP_O2	r =	-0,577	0,583
	p =	0,012	0,011

**Tabelle 8: Total-Power während des PSTs unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
TotP_F4	$r =$	0,330	-0,232
	$p =$	0,168	0,355
TotP_C3	$r =$	-0,058	0,226
	$p =$	0,814	0,366
TotP_O2	$r =$	0,242	-0,232
	$p =$	0,318	0,355

### 3.2.2. Hirnelektrische Alpha-, Beta-, und Gamma-Aktivität und Testergebnisse

Es zeigen sich keine statistisch bedeutsamen Zusammenhänge zwischen absoluter Alpha-Power und der Testergebnisse während der Vigilanztests am nächsten Morgen (siehe Anhang, Tabelle A2-5)

Für die relative Alpha-Power lassen sich folgende Zusammenhänge beschreiben: Unter Belohnungsbedingung zeigt sich über frontal ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen relativer Alpha-Power und sowohl versäumten Ereignissen während des VigiMars als auch der Standardabweichung (Tabelle 9).

Je mehr relative Alpha-Power, desto niedriger die Vigilanz während des VigiMars unter Belohnungsbedingung.

Unter Teilnahmebedingung zeigen sich ähnliche Ergebnisse bezüglich der relativen Alpha-Power okzipital. Viel Alpha-Power korreliert hier positiv mit der Anzahl der versäumten Ereignisse, der Standardabweichung und der mittleren Reaktionszeit (siehe Tabelle 10).

Je mehr relative Alpha-Power, desto niedriger die Vigilanz während des VigiMars auch unter Teilnahmebedingung.

**Tabelle 9: Relative Alpha-Power unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rAP_F4	r =	0,552	0,411	0,528
	p =	0,022	0,091	0,024
rAP_C3	r =	0,378	0,133	0,360
	p =	0,122	0,598	0,143
rAP_O2	r =	0,461	0,222	0,235
	p =	0,054	0,375	0,349

**Tabelle 10: Relative Alpha-Power unter Teilnahme während des Vigimars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rAP_F4	r =	0,253	0,089	0,262
	p =	0,296	0,716	0,278
rAP_C3	r =	0,377	0,232	0,303
	p =	0,111	0,340	0,208
rAP_O2	r =	0,618	0,458	0,547
	p =	0,005	0,049	0,015

Es zeigen sich keine statistisch bedeutsamen Zusammenhänge zwischen der relativen Alhpower während des PSTs und den Ergebnisparametern (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Relative Alpha-Power unter Belohnung während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe-index	Monotonie Resistenz Status
rAP_F4	r =	-0,096	0,102
	p =	0,705	0,686
rAP_C3	r =	0,022	-0,001
	p =	0,932	0,997
rAP_O2	r =	0,257	-0,250
	p =	0,303	0,316

Unter Teilnahmebedingung ergeben sich signifikante Zusammenhänge zwischen der relativen frontalen Alpha-Power und den Testergebnissen des PSTs. Eine höhere relative Alpha-Power korreliert hier signifikant mit einem niedrigen PUI (Tabelle 12).

Je mehr relative Alpha-Power frontal, desto besser die Ergebnisse des PUI, desto höher die Vigilanz während des PST. Die Ergebnisse zum MRS zeigen hier lediglich eine ähnliche Tendenz.

**Tabelle 12: Relative Alpha-Power unter Teilnahme während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rAP_F4	r =	-0,461	0,445
	p =	0,047	0,064
rAP_C3	r =	-0,214	0,138
	p =	0,379	0,586
rAP_O2	r =	0,253	-0,193
	p =	0,297	0,442

Die Ergebnisse zur Messung der absoluten Beta-Power zeigen lediglich Tendenzen. Unter Belohnungsbedingung zeigt sich frontal und okzipital tendenziell eine negative Korrelation zwischen Beta-Power und den versäumten Ereignissen, der mittleren Reaktionszeit, und der Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit.

Je mehr Beta-Power während des VigiMars, desto weniger versäumte Ereignisse, desto geringer die mittlere Reaktionszeit und desto geringer die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit (Tabelle 13). Eine höhere absolute Beta-Power über frontal und okzipital spricht also für eine höhere Vigilanz unter Belohnungsbedingungen.

Unter Teilnahme lassen sich keine bedeutsamen Korrelationen zwischen der absoluten Alpha-Power und den Testergebnissen des VigiMars beobachten (Tabelle 14).

**Tabelle 13: Absolute Beta-Power unter Belohnung während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
BP_F4	$r =$	-0,378	-0,400	-0,429
	$p =$	0,122	0,100	0,076
BP_C3	$r =$	-0,090	-0,148	-0,231
	$p =$	0,723	0,558	0,356
BP_O2	$r =$	-0,432	-0,427	-0,358
	$p =$	0,074	0,077	0,144

**Tabelle 14: Absolute Beta-Power unter Teilnahme während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
BP_F4	$r =$	-0,283	-0,239	-0,294
	$p =$	0,240	0,325	0,222
BP_C3	$r =$	0,011	0,067	-0,045
	$p =$	0,965	0,786	0,856
BP_O2	$r =$	-0,065	0,054	-0,049
	$p =$	0,792	0,825	0,842

Während des PST zeigt sich unter Belohnungsbedingung ein statistisch bedeutsamer positiver Zusammenhang zwischen der absoluten Beta-Power und einem niedrigen Pupillenunruheindex sowie einem hohem Monotonie-Resistenz-Status über der okzipitalen Ableitung (Tabelle 15).

Je größer die absolute Beta-Power okzipital, desto besser die Testergebnisse während des PST unter Belohnung.

Unter Teilnahmebedingung lassen sich keine signifikanten Korrelationen zwischen absoluter Alpha-Power und Pupillenunruheindex und dem Monotonie Resistenzstatus beobachten (Tabelle 16).



**Tabelle 15: Absolute Beta-Power unter Belohnung während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
BP_F4	$r =$	-0,005	0,020
	$p =$	0,984	0,938
BP_C3	$r =$	-0,057	0,079
	$p =$	0,823	0,756
BP_O2	$r =$	-0,498	0,495
	$p =$	0,035	0,037

**Tabelle 16: Absolute Beta-Power unter Teilnahme während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
BP_F4	$r =$	0,405	-0,304
	$p =$	0,085	0,220
BP_C3	$r =$	0,237	-0,088
	$p =$	0,329	0,729
BP_O2	$r =$	0,375	-0,338
	$p =$	0,113	0,170

Die relative Beta-Power zeigt unter Belohnungsbedingung keinen bedeutsamen Zusammenhang mit den Testergebnissen des VigiMars und des PSTs (siehe Anhang Tabelle A6-7).

Unter Teilnahmebedingung korreliert eine hohe relative Beta-Power über frontal und zentral signifikant mit einer höheren Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit. Für die versäumten Ereignisse und die mittlere Reaktionszeit lässt sich eine ähnliche Tendenz erkennen (Tabelle 17).

Eine größere relative Beta-Power spricht hier für niedrigere Vigilanz während des VigiMars.

Die relative Beta-Power unter Teilnahmebedingung zeigt lediglich über der okzipitalen Ableitung einen bedeutsamen Zusammenhang zu den Testergebnissen

des PSTs (Tabelle 18). Eine hohe relative Beta-Power während des Tests spricht hierbei für einen höheren PUI.

**Tabelle 17: Relative Beta-Power unter Teilnahme während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rBP_F4	r =	0,439	0,440	0,484
	p =	0,060	0,059	0,036
rBP_C3	r =	0,439	0,440	0,484
	p =	0,060	0,059	0,036
rBP_O2	r =	0,138	0,139	0,219
	p =	0,574	0,571	0,367

**Tabelle 18: Relative Beta-Power unter Teilnahme während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruheindex	Monotonie Resistenz Status
rBP_F4	r =	-0,009	-0,135
	p =	0,972	0,592
rBP_C3	r =	-0,012	-0,109
	p =	0,960	0,668
rBP_O2	r =	0,470	-0,383
	p =	0,042	0,117

Für die Gamma-Power ergaben sich unter Belohnung frontal eine tendenziell negative Korrelation mit den versäumten Ereignissen und der mittleren Reaktionszeit und eine signifikant negative Korrelation mit der Standardabweichung der Reaktionszeit. Über der okzipitalen Ableitung zeigte sich ein statistisch bedeutsamer negativer Zusammenhang zwischen Gamma-Power und versäumten Ereignissen, mittlerer Reaktionszeit, und der Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit (Tabelle 19).

Höhere Gamma-Power geht hier also mit einer höheren Vigilanz während des VigiMars einher.

Die absolute Gamma-Power unter Teilnahmebedingung zeigt keinen bedeutsamen Zusammenhang zu den Ergebnissen des VigiMars (Tabelle 20).

**Tabelle 19: Absolute Gamma-Power unter Belohnung während des VigiMars**  
(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
GP_F4	$r =$	-0,426	-0,394	-0,485
	$p =$	0,078	0,106	0,042
GP_C3	$r =$	-0,292	-0,286	-0,407
	$p =$	0,240	0,249	0,094
GP_O2	$r =$	-0,545	-0,512	-0,523
	$p =$	0,019	0,030	0,026

**Tabelle 20: Absolute Gamma-Power unter Teilnahme während des VigiMars**  
(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
GP_F4	$r =$	-0,352	-0,288	-0,363
	$p =$	0,139	0,232	0,126
GP_C3	$r =$	0,008	0,125	-0,047
	$p =$	0,974	0,611	0,847
GP_O2	$r =$	-0,272	-0,191	-0,293
	$p =$	0,259	0,433	0,223

Auch für die hirnelektrische Messung während des PSTs zeigt sich unter Belohnungsbedingung ein signifikanter Zusammenhang zwischen hoher absoluter Gamma-Power und niedrigem Pupillenunruheindex und hohem Monotonie Resistenz Status über der okzipitalen Ableitung (Tabelle 21). Auch hier spricht hohe Gamma-Power für höhere Vigilanz.

Unter Teilnahmebedingung ergeben sich keine signifikanten Ergebnisse bezüglich des Zusammenhangs zwischen absoluter Gamma-Power und den Testergebnissen während des PSTs (Tabelle 22).

**Tabelle 21: Absolute Gamma-Power unter Belohnung während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
GP_F4	$r =$	-0,003	0,004
	$p =$	0,990	0,987
GP_C3	$r =$	-0,106	0,097
	$p =$	0,675	0,701
GP_O2	$r =$	-0,484	0,477
	$p =$	0,042	0,045

**Tabelle 22: Absolute Gamma-Power unter Teilnahme während des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
GP_F4	$r =$	0,446	-0,375
	$p =$	0,056	0,125
GP_C3	$r =$	0,307	-0,235
	$p =$	0,201	0,348
GP_O2	$r =$	0,412	-0,374
	$p =$	0,079	0,126

Die Messungen der relativen Gamma-Power während der Testungen zeigen keine bedeutsamen Zusammenhänge zu den Testergebnissen des Vigimars und PSTs (siehe Anhang Tabelle A8-11).

### 3.2.3. Hirnelektrische Delta- und Theta-Aktivitäten und Test- ergebnisse

Die absolute Delta-Power korreliert unter Belohnung über den frontalen und zentralen Ableitungen signifikant negativ mit den versäumten Ereignissen und der Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit sowie tendenziell auch mit der mittleren Reaktionszeit. Je mehr absolute Delta-Power, desto geringer die Anzahl der versäumten Ereignisse, desto geringer die mittlere Reaktionszeit und desto geringer die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit während des VigiMars (Tabelle 23). Viel Delta-Power spricht hier also für höhere Vigilanz.

Unter Teilnahmebedingung zeigen sich Ergebnisse, die in dieselbe Richtung deuten, jedoch nicht statistisch signifikant sind (Tabelle 24).

**Tabelle 23: Absolute Delta-Power unter Belohnung während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standard- abweichung
DP_F4	$r =$	-0,579	-0,462	-0,607
	$p =$	0,012	0,053	0,008
DP_C3	$r =$	-0,501	-0,346	-0,504
	$p =$	0,016	0,159	0,033
DP_O2	$r =$	-0,207	-0,007	-0,102
	$p =$	0,411	0,977	0,686

**Tabelle 24: Absolute Delta-Power unter Teilnahme während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standard- abweichung
DP_F4	$r =$	-0,240	-0,095	-0,238
	$p =$	0,323	0,700	0,327
DP_C3	$r =$	-0,385	-0,211	-0,353
	$p =$	0,103	0,387	0,138
DP_O2	$r =$	-0,234	-0,156	-0,326
	$p =$	0,334	0,523	0,174

Die hirnelektrischen Messungen während des PSTs zeigen keine bedeutsamen Zusammenhänge bezüglich der absoluten Delta-Power und der Testergebnisse (siehe Anhang, Tabelle A12-13).

Es zeigen sich statistisch signifikante Ergebnisse bezüglich des Zusammenhangs von relativer Delta-Power und den Testergebnissen während des Vigimars (siehe Anhand, Tabelle A14-15).

Während des PSTs ergeben sich unter Belohnung ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse für den Zusammenhang zwischen relativer Delta-Power und Pupillenunruheindex und Monotonie Resistenz Status (Tabelle 25).

Unter Teilnahme korreliert eine hohe relative Delta-Power über der okzipitalen Ableitung aber signifikant mit einem niedrigen Pupillenunruheindex und einem hohen Monotonie Resistenzstatus (Tabelle 26). Hohe relative Delta-Power spricht hier für eine hohe Vigilanz während des PST.

**Tabelle 25: Relative Delta-Power unter Belohnung während des PSTs**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, B = Belohnung)*

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rDP_F4	r =	0,228	-0,238
	p =	0,363	0,342
rDP_C3	r =	0,040	-0,039
	p =	0,874	0,877
rDP_O2	r =	0,209	-0,218
	p =	0,404	0,384

**Tabelle 26: Relative Delta-Power unter Teilnahme während des PSTs**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, T = Teilnahme)*

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rDP_F4	r =	-0,091	0,245
	p =	0,710	0,327
rDP_C3	r =	0,049	0,090
	p =	0,842	0,723
rDP_O2	r =	-0,475	0,450
	p =	0,040	0,061

Die Messungen der absoluten Theta-Power während der Testungen ergeben uneinheitliche Ergebnisse (siehe Anhang, Tabelle A16-19).

Bei der relativen Theta-Power ergeben sich unter Belohnungsbedingung über der frontalen Ableitung eine signifikant positive Korrelation zwischen Theta-Power und mittlerer Reaktionszeit sowie Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit. Hohe Theta-Power spricht hier für niedrigere Vigilanz. Eine gleiche Tendenz, zeigt sich hier für die versäumten Ereignisse (Tabelle 27).

Unter Teilnahmebedingungen lassen sich ebenfalls ähnliche Tendenzen erkennen. Je mehr relative Theta Power über den frontalen und zentralen Ableitungen, desto mehr versäumte Ereignisse, desto höher die mittlere Reaktionszeit und die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit.

Eine höhere relative Theta-Power geht also mit niedrigerer Vigilanz einher. Ein signifikantes Ergebnis zeigt sich hier allerdings nur für die mittlere Reaktionszeit über der zentralen Ableitung (Tabelle 28).

**Tabelle 27: Relative Theta-Power unter Belohnung während des VigiMars**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)*

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
$\bar{r}TP_{F4}$	$r=$	0,326	0,475	0,530
	$p=$	0,187	0,047	0,024
$\bar{r}TP_{C3}$	$r=$	0,245	0,249	0,427
	$p=$	0,328	0,319	0,077
$\bar{r}TP_{O2}$	$r=$	0,034	0,040	0,041
	$p=$	0,892	0,874	0,871

**Tabelle 28: Relative Theta-Power unter Teilnahme während des VigiMars**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
$\bar{r}_{TP\_F4}$	$r =$	0,400	0,404	0,429
	$p =$	0,090	0,087	0,067
$\bar{r}_{TP\_C3}$	$r =$	0,450	0,475	0,451
	$p =$	0,053	0,040	0,053
$\bar{r}_{TP\_O2}$	$r =$	0,242	0,279	0,224
	$p =$	0,318	0,247	0,357

Die relative Theta-Power während des PST korreliert nicht signifikant mit den Testergebnissen (siehe Anhang, Tabelle A20-21).

### 3.3. Nächtliche hirnelektrische Aktivität und Testergebnisse am nächsten Morgen

#### 3.3.1. Nächtliche hirnelektrische Total-Power und Testergebnisse am nächsten Morgen

Die hirnelektrische Total-Power während der Nacht korreliert nicht signifikant mit den Testergebnissen des nächsten Morgens (siehe Anhang, Tabelle A22-25).

#### 3.3.2. Nächtliche hirnelektrische Alpha- Beta- und Gamma-Aktivitäten und Testergebnisse am nächsten Morgen

Es besteht kein relevanter Zusammenhang zwischen der absoluten und relativen Alpha-Power und den Testergebnissen am nächsten Morgen. Es zeigen sich uneinheitliche, nicht signifikante Ergebnisse (siehe Anhang, Tabelle A26-33).



Die Messung der absoluten Beta-Power während der Nacht zeigt ebenfalls keinen statistisch bedeutsamen Zusammenhang mit den Ergebnissen des VigiMars am nächsten Morgen (siehe Anhang Tabelle A34-35).

Für den Zusammenhang zwischen der absoluten Beta-Power während der Nacht und den Testergebnissen des PSTs am nächsten Morgen gilt:

Unter Belohnung zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen einer hohen absoluten zentralen Beta-Power und einem hohen Pupillenunruheindex und niedrigen Monotonie Resistenz Status am nächsten Morgen. Eine hohe Beta-Power in der Nacht spricht hier also für eine schlechtere Testleistung während des PSTs am nächsten Morgen (Tabelle 29). Dies gilt allerdings nur unter Belohnungsbedingung. Unter Teilnahmebedingung zeigt sich kein Zusammenhang zwischen absoluter Beta-Power und den Testergebnissen des PSTs am nächsten Morgen (Tabelle 30).

**Tabelle 29: Absolute Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, B = Belohnung)*

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
BP_N_F4	r =	0,451	-0,462
	p =	0,060	0,054
BP_N_C3	r =	0,511	-0,514
	p =	0,030	0,029
BP_N_O2	r =	-0,232	0,236
	p =	0,354	0,346

**Tabelle 30: Absolute Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
BP_N_F4	$r =$	-0,046	0,238
	$p =$	0,855	0,358
BP_N_C3	$r =$	-0,032	0,226
	$p =$	0,900	0,384
BP_N_O2	$r =$	-0,055	0,240
	$p =$	0,829	0,352

Weitere deutlich signifikante Zusammenhänge lassen sich zwischen der relativen Beta-Power der Nacht und den Ergebnissen des VigiMars am nächsten Morgen erkennen.

Unter Belohnung spricht eine hohe relative Beta-Power in der Nacht über allen Ableitungen für eine hohe Anzahl versäumter Ereignisse am nächsten Morgen. Weiterhin zeigt sich diese Richtung auch für die mittlere Reaktionszeit und die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit, die Zusammenhänge sind allerdings nicht statistisch signifikant.

Bei hoher relativer Beta-Power in der Nacht zeigt sich am nächsten Morgen also eher eine niedrige Vigilanz während des VigiMars (Tabelle 31).

Dies gilt nur unter Belohnungsbedingung, unter Teilnahmebedingung korreliert die relative Beta-Power der Nacht nicht signifikant mit den Testergebnissen des VigiMars am nächsten Morgen (Tabelle 32).

**Tabelle 31: Relative Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rBP_N_F4	$r=$	0,548	0,164	0,219
	$p=$	0,019	0,514	0,382
rBP_N_C3	$r=$	0,580	0,233	0,195
	$p=$	0,012	0,353	0,439
rBP_N_O2	$r=$	0,491	0,286	0,149
	$p=$	0,038	0,249	0,555

**Tabelle 32: Relative Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rBP_N_F4	$r=$	0,291	0,220	0,297
	$p=$	0,242	0,381	0,231
rBP_N_C3	$r=$	0,426	0,348	0,380
	$p=$	0,078	0,157	0,120
rBP_N_O2	$r=$	-0,188	-0,160	-0,075
	$p=$	0,454	0,526	0,766

Eine hohe relative Beta-Power okzipital während der Nacht unter Belohnungsbedingung geht signifikant mit einem höheren Pupillenunruheindex und niedrigem Monotonie Resistenz Status am nächsten Morgen einher.

Je mehr relative Beta-Power in der Nacht, desto schlechter die Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen. Dies gilt nur unter Belohnungsbedingung.

Unter Teilnahme ergibt sich kein Zusammenhang zwischen relativer Beta-Power in der Nacht und den Testergebnissen des PSTs am nächsten Morgen (Tabelle 34).

**Tabelle 33: Relative Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rBP_N_F4	$r =$	0,290	-0,276
	$p =$	0,243	0,267
rBP_N_C3	$r =$	0,331	-0,324
	$p =$	0,179	0,190
rBP_N_O2	$r =$	0,509	-0,511
	$p =$	0,031	0,030

**Tabelle 34: Relative Beta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rBP_N_F4	$r =$	0,148	-0,185
	$p =$	0,559	0,477
rBP_N_C3	$r =$	0,226	-0,275
	$p =$	0,367	0,286
rBP_N_O2	$r =$	0,263	-0,168
	$p =$	0,291	0,519

Die Messwerte der absoluten Gamma-Power während der Nacht zeigt keinen bedeutsamen Zusammenhang zu den Testleistungen des VigiMars und PSTs am nächsten Morgen (siehe Anhang Tabelle A36-39).

Es besteht ebenso kein statistisch bedeutsamer Zusammenhang zwischen relativer Gamma-Power in der Nacht und den Ergebnissen des VigiMars am nächsten Morgen (siehe Anhang, Tabelle A40-41).

Für den PST gilt, dass eine hohe relative nächtliche Gamma-Power über der okzipitalen Ableitung unter Belohnungsbedingung statistisch bedeutsam mit ei-

nem hohen Pupillenunruheindex und einem niedrigen Monotonie-Resistenz-Status korreliert (Tabelle 35).

Hohe Gamma-Power in der Nacht geht unter Belohnungsbedingung mit schlechten Testleistungen während des PSTs am nächsten Morgen einher.

Unter Teilnahmebedingung zeigen sich uneinheitliche Zusammenhänge zwischen nächtlicher relativer Gamma-Power und den Testergebnissen des PSTs am nächsten Morgen (Tabelle 36).

**Tabelle 35: Relative Gamma-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, B = Belohnung)*

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rGP_N_F4	r =	0,183	-0,163
	p =	0,468	0,519
rGP_N_C3	r =	0,271	-0,272
	p =	0,276	0,274
rGP_N_O2	r =	0,538	-0,539
	p =	0,021	0,021

**Tabelle 36: Relative Gamma-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

*(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt, r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit, T = Teilnahme)*

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rGP_N_F4	r =	0,247	-0,315
	p =	0,324	0,218
rGP_N_C3	r =	0,238	-0,304
	p =	0,341	0,235
rGP_N_O2	r =	0,267	-0,148
	p =	0,284	0,570

### 3.3.3. Nächtliche hirnelektrische Delta- und Theta-Aktivitäten und Testergebnisse am nächsten Morgen

Unter Belohnungsbedingung korreliert eine hohe absolute nächtliche Delta-Power über der frontalen und zentralen Ableitung signifikant mit weniger versäumten Ereignissen während des VigiMars. Tendenziell geht eine hohe absolute Delta-Power in der Nacht auch mit einer niedrigeren Reaktionszeit und einer niedrigeren Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit einher (Tabelle 37). Bei höherer absoluter Delta-Power in der Nacht zeigen sich also bessere Testergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen.

Unter Teilnahmebedingung lässt sich ein statistisch bedeutsamer Zusammenhang zwischen einer hohen absoluten Delta-Power über der zentralen Ableitung und einer niedrigen Anzahl versäumter Ereignisse, einer niedrigen mittleren Reaktionszeit und einer niedrigen Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit beobachten (Tabelle 38).

Auch hier gilt: viel absolute Delta-Power in der Nacht korreliert mit einer höheren Vigilanz am nächsten Morgen.

**Tabelle 37: Absolute Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
DP_N_F4	$r=$	-0,499	-0,307	-0,294
	$p=$	0,035	0,215	0,237
DP_N_C3	$r=$	-0,482	-0,342	-0,294
	$p=$	0,043	0,164	0,237
DP_N_O2	$r=$	-0,452	-0,344	-0,155
	$p=$	0,060	0,162	0,539

**Tabelle 38: Absolute Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
DP_N_F4	$r =$	-0,283	-0,284	-0,313
	$p =$	0,255	0,254	0,206
DP_N_C3	$r =$	-0,478	-0,482	-0,499
	$p =$	0,045	0,043	0,035
DP_N_O2	$r =$	0,096	0,042	-0,007
	$p =$	0,705	0,868	0,977

Unter Belohnungsbedingung korreliert eine hohe absolute, nächtliche Delta-Power okzipital mit einem niedrigen Pupillenunruheindex und einem hohen Monotonie Resistenz Status am nächsten Morgen.

Je mehr absolute Delta-Power in der Nacht, desto höher die Vigilanz während des morgendlichen PSTs (Tabelle 39)

Dies zeigt sich nur unter Belohnungsbedingung. Unter Teilnahmebedingung ergibt sich kein bedeutsamer Zusammenhang zwischen absoluter Delta-Power und den Ergebnissen des PSTs am nächsten Morgen (Tabelle 40).

**Tabelle 39: Absolute Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruheindex	Monotonie Resistenz Status
DP_N_F4	$r =$	0,106	-0,116
	$p =$	0,675	0,647
DP_N_C3	$r =$	0,055	-0,065
	$p =$	0,829	0,797
DP_N_O2	$r =$	-0,543	0,482
	$p =$	0,049	0,043

**Tabelle 40: Absolute Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
DP_N_F4	$r =$	-0,154	0,348
	$p =$	0,542	0,170
DP_N_C3	$r =$	-0,267	0,463
	$p =$	0,284	0,062
DP_N_O2	$r =$	-0,379	0,363
	$p =$	0,121	0,152

Für die relative Delta-Power gilt: unter Belohnungsbedingung geht eine hohe nächtliche relative Delta-Power frontal signifikant mit einer geringeren Anzahl versäumter Ereignisse einher. Auch über der zentralen und okzipitalen Ableitung zeigen sich dieselben, wenn auch nicht ganz signifikanten Zusammenhänge (Tabelle 41). Mehr nächtliche Delta-Power geht also mit höherer Vigilanz während des VigiMars am nächsten Morgen einher.

Auch unter Teilnahmebedingung spricht eine hohe relative Delta-Power zentral für signifikant weniger versäumte Ereignisse während des VigiMars. Für die mittlere Reaktionszeit und die Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit lassen sich ähnliche Tendenzen erkennen. Je mehr absolute Delta-Power in der Nacht, desto höher die Vigilanz während des VigiMars am nächsten Morgen (Tabelle 41).



**Tabelle 41: Relative Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rDP_N_F4	$r =$	-0,510	-0,237	-0,376
	$p =$	0,031	0,344	0,125
rDP_N_C3	$r =$	-0,460	-0,206	-0,299
	$p =$	0,055	0,413	0,228
rDP_N_O2	$r =$	-0,456	-0,369	0,082
	$p =$	0,057	0,132	0,747

**Tabelle 42: Relative Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
rDP_N_F4	$r =$	-0,286	-0,216	-0,251
	$p =$	0,249	0,390	0,315
rDP_N_C3	$r =$	-0,471	-0,381	-0,403
	$p =$	0,049	0,119	0,098
rDP_N_O2	$r =$	0,058	0,020	-0,065
	$p =$	0,819	0,938	0,798

Unter Belohnungsbedingung korreliert eine hohe relative Delta-Power okzipital signifikant mit einem niedrigen Pupillenunruheindex und einem hohen Monotonie Resistenz Status (Tabelle 43). Je mehr relative Delta-Power in der Nacht, desto besser die Testergebnisse des PSTs am nächsten Morgen.

Dies ist unter Teilnahmebedingung nicht zu beobachten (Tabelle 44).

**Tabelle 43: Relative Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rDP_N_F4	$r =$	0,022	-0,043
	$p =$	0,932	0,864
rDP_N_C3	$r =$	-0,160	0,159
	$p =$	0,526	0,527
rDP_N_O2	$r =$	-0,480	0,484
	$p =$	0,044	0,042

**Tabelle 44: Relative Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rDP_N_F4	$r =$	-0,100	0,133
	$p =$	0,693	0,612
rDP_N_C3	$r =$	-0,084	0,152
	$p =$	0,742	0,560
rDP_N_O2	$r =$	-0,226	0,088
	$p =$	0,367	0,736

Die Absolutwerte der Korrelationen weisen auf einen Zusammenhang zwischen höherer absoluter Theta-Power und einer niedrigeren Anzahl versäumter Ereignisse, einer niedrigeren mittleren Reaktionszeit und einer niedrigeren Standardabweichung der mittleren Reaktionszeit hin. Diese Zusammenhänge sind aber nicht statistisch signifikant. Dies gilt sowohl unter Belohnungs - als auch unter Teilnahmebedingung (Tabelle 45-46).

**Tabelle 45: Absolute Theta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
TP_N_F4	$r =$	-0,337	-0,084	-0,342
	$p =$	0,171	0,741	0,164
TP_N_C3	$r =$	-0,366	-0,024	-0,338
	$p =$	0,135	0,925	0,170
TP_N_O2	$r =$	-0,305	-0,177	-0,374
	$p =$	0,219	0,483	0,127

**Tabelle 46: Absolute Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Versäumte Ereignisse	Mittlere Reaktionszeit	Standardabweichung
TP_N_F4	$r =$	-0,153	-0,201	-0,186
	$p =$	0,545	0,423	0,460
TP_N_C3	$r =$	-0,160	-0,257	-0,207
	$p =$	0,526	0,303	0,411
TP_N_O2	$r =$	0,185	0,156	0,126
	$p =$	0,462	0,537	0,618

Für die Zusammenhänge der relativen nächtlichen Theta-Power mit den Ergebnissen der VigiMar ergeben sich keine statistisch bedeutsamen Ergebnisse (siehe Anhang Tabelle A44-45).

Für die Zusammenhänge zwischen der absoluten Theta-Power in der Nacht und den Testergebnissen des PST am nächsten Morgen ergeben sich uneinheitliche Ergebnisse (siehe Anhang Tabelle A42-43).

Eine hohe relative Theta-Power während der Nacht geht unter Belohnung über den zentralen und okzipitalen Ableitungen signifikant mit einem niedrigen Pupillenunruheindex einher.

Unter Teilnahme gilt dies auch über der okzipitalen Ableitung. Sowohl unter Teilnahme, als auch unter Belohnung lässt sich Ähnliches auch über der frontalen Ableitung erkennen. Mehr relative Theta-Power in der Nacht spricht also für bessere Testleistungen während des PSTs am nächsten Morgen. Unter Belohnungsbedingung zeigen sich diese Zusammenhänge wesentlich deutlicher als unter Teilnahme.

**Tabelle 47: Relative Theta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

Belohnung		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rTP_N_F4	$r =$	-0,344	0,346
	$p =$	0,163	0,160
rTP_N_C3	$r =$	-0,556	0,559
	$p =$	0,017	0,016
rTP_N_O2	$r =$	-0,680	0,678
	$p =$	0,002	0,002

**Tabelle 48: Relative Delta-Power in der Nacht und Ergebnisse des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahme**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

Teilnahme		Pupillenunruhe- index	Monotonie Resistenz Status
rTP_N_F4	$r =$	-0,383	0,356
	$p =$	0,117	0,161
rTP_N_C3	$r =$	-0,079	0,074
	$p =$	0,754	0,779
rTP_N_O2	$r =$	-0,521	0,438
	$p =$	0,027	0,079

### **3.4. Nächtliche und morgendliche hirnelektrische Aktivität während der Tests**

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Korrelationen bei gleichzeitiger Prüfung aller Kombinationen von Lokalisationen und Powerwerten, werden hier nur Beziehungen der entsprechenden Lokalisationen zueinander dargestellt. Also zum Beispiel die Korrelation der nächtlichen Total-Power-Aktivität frontal zu der morgendlichen Total-Power-Aktivität frontal, oder die Korrelation der nächtlichen Alpha-Aktivität okzipital und der morgendlichen Alpha-Aktivität okzipital, usw.

#### **3.4.1. Nächtliche Total-Power und absolute Power während der Nacht und während des Vigimars am nächsten Morgen**

Es zeigen sich sowohl über frontal, zentral und okzipital deutlich signifikante Korrelationen zwischen der absoluten Power in der Nacht und am nächsten Morgen. Hierbei fällt auf, dass häufig die Power der gleichen Lokalisationen der Nacht und des nächsten Morgens stark miteinander korrelieren. Die Powerspektren der Nacht ähneln also den Powerspektren am Tag.

Unter Belohnungsbedingung korreliert z.B. die Total-Power in der Nacht und Total-Power am Morgen sowie die Delta-Power in der Nacht und Delta-Power am Morgen. Dies gilt auch für die absolute Alpha-Power und die absolute Gamma Power. Wie man in Tabelle 49 sieht, ergibt sich hieraus eine Art Diagonale von oben links nach unten rechts, auf der die Korrelationen der zueinander passenden Power der Nacht und am Morgen liegen. Lediglich für die Beta-Power ergibt sich hier keine signifikante Korrelation.

**Tabelle 49: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des Vigils am nächsten Morgen unter Belohnung über der frontalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  =Belohnung)

		TotP_VG_B_F4	DP_VG_B_F4	TP_VG_B_F4	AP_VG_B_F4	BP_VG_B_F4	GP_VG_B_F4
TotP_N_F4	r=	0,612	0,550	0,759	0,882	0,556	0,453
	p=	0,012	0,027	0,001	< 0,000	0,025	0,078
DP_N_F4	r=	0,621	0,603	0,815	0,782	0,371	0,250
	p=	0,010	0,013	< 0,000	< 0,000	0,158	0,350
TP_N_F4	r=	0,468	0,429	0,750	0,806	0,444	0,321
	p=	0,068	0,097	0,001	< 0,000	0,085	0,226
AP_N_F4	r=	0,441	0,485	0,703	0,838	0,482	0,412
	p=	0,087	0,057	0,002	< 0,000	0,058	0,113
BP_N_F4	r=	0,400	0,465	0,547	0,624	0,329	0,353
	p=	0,125	0,070	0,028	0,010	0,213	0,180
GP_N_F4	r=	0,329	0,194	0,121	0,312	0,447	0,503
	p=	0,213	0,471	0,656	0,240	0,083	0,047

Auch über der zentralen Ableitung lassen sich ähnliche Ergebnisse beschreiben. Wieder ergeben sich stark signifikante Korrelationen zwischen der nächtlichen und morgendlichen absoluten Total-Power und der nächtlichen und morgendlichen Delta-Power. Auch die nächtlichen Theta-, Alpha-, und Gamma-Power korreliert mit der passenden morgendlichen Power signifikant. Wieder lässt sich eine Diagonale von oben links nach unten rechts erkennen, bei der lediglich die Beta-Power nicht miteinander statistisch bedeutsam korreliert (Tabelle 50).

**Tabelle 50: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des Vigimars am nächsten Morgen unter Belohnung über der zentralen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		TotP_VG_B_C3	DP_VG_B_C3	TP_VG_B_C3	AP_VG_B_C3	BP_VG_B_C3	GP_VG_B_C3
TotP_N_C3	r=	0,650	0,694	0,812	0,562	0,394	0,409
	p=	0,006	0,003	< 0,000	0,024	0,131	0,116
DP_N_C3	r=	0,544	0,585	0,785	0,476	0,259	0,306
	p=	0,029	0,017	< 0,000	0,062	0,333	0,249
TP_N_C3	r=	0,456	0,441	0,747	0,500	0,229	0,206
	p=	0,076	0,087	0,001	0,049	0,393	0,444
AP_N_C3	r=	0,426	0,324	0,635	0,721	0,300	0,112
	p=	0,099	0,222	0,008	0,002	0,259	0,680
BP_N_C3	r=	0,471	0,435	0,474	0,462	0,344	0,259
	p=	0,066	0,092	0,064	0,072	0,192	0,333
GP_N_C3	r=	0,697	0,635	0,571	0,347	0,574	0,585
	p=	0,003	0,008	0,021	0,188	0,020	0,017

Über der okzipitalen Ableitung korrelieren die nächtliche Total-, Delta-, Theta-, Alpha-, und Beta-Power mit der jeweils zugehörigen Power am nächsten Morgen. Für die Gamma-Power ergibt sich keine statistisch bedeutsame Korrelation. Weiterhin sieht man in Tabelle 51, dass auch viele andere Povern miteinander korrelieren, sodass die oben beschriebene Diagonale nicht ganz so deutlich zu sehen ist.

**Tabelle 51: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des Vigimars am nächsten Morgen unter Belohnung über der okzipitalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		TotP_VG_B_O2	DP_VG_B_O2	TP_VG_B_O2	AP_VG_B_O2	BP_VG_B_O2	GP_VG_B_O2
TotP_N_O2	r=	0,659	0,579	0,679	0,697	0,579	0,353
	p=	0,006	0,019	0,004	0,003	0,019	0,180
DP_N_O2	r=	0,641	0,547	0,712	0,650	0,535	0,365
	p=	0,007	0,028	0,002	0,006	0,033	0,165
TP_N_O2	r=	0,703	0,703	0,885	0,812	0,524	0,256
	p=	0,002	0,002	0,000	0,000	0,037	0,339
AP_N_O2	r=	0,676	0,579	0,621	0,768	0,653	0,344
	p=	0,004	0,019	0,010	0,001	0,006	0,192
BP_N_O2	r=	0,576	0,488	0,488	0,653	0,550	0,315
	p=	0,019	0,055	0,055	0,006	0,027	0,235
GP_N_O2	r=	0,544	0,550	0,438	0,403	0,415	0,365
	p=	0,029	0,027	0,090	0,122	0,110	0,165

Auch unter Teilnahmebedingung zeigt sich ganz deutlich die Korrelation zwischen nächtlicher Power und der zugehörigen Power am nächsten Morgen. Für die Power über der frontalen Ableitung sieht man in Tabelle 52 die Korrelationen zwischen der nächtlichen Total-, absoluter Delta-, Theta-, Alpha-, und Beta-Power mit der jeweiligen Power am nächsten Morgen. Wieder ergibt sich hieraus das grafische Phänomen einer Diagonalen von links oben nach rechts unten.

**Tabelle 52: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des Vigils am nächsten Morgen unter Teilnahme über der frontalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt.  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		TotP_VG_T_F4	DP_VG_T_F4	TP_VG_T_F4	AP_VG_T_F4	BP_VG_T_F4	GP_VG_T_F4
TotP_N_F4	r=	0,571	0,520	0,527	0,483	0,549	0,387
	p=	0,017	0,033	0,030	0,050	0,022	0,125
DP_N_F4	r=	0,669	0,615	0,635	0,574	0,574	0,461
	p=	0,003	0,009	0,006	0,016	0,016	0,063
TP_N_F4	r=	0,510	0,451	0,627	0,596	0,490	0,299
	p=	0,037	0,069	0,007	0,012	0,046	0,244
AP_N_F4	r=	0,395	0,346	0,471	0,517	0,414	0,164
	p=	0,117	0,174	0,057	0,034	0,098	0,529
BP_N_F4	r=	0,387	0,314	0,387	0,404	0,498	0,243
	p=	0,125	0,220	0,125	0,107	0,042	0,348
GP_N_F4	r=	0,402	0,338	0,355	0,387	0,539	0,358
	p=	0,110	0,184	0,162	0,125	0,026	0,158



Für die Power über der zentralen Ableitung ergeben sich signifikante Korrelationen zwischen der nächtlichen absoluten Delta-, Theta-, und Alpha-Power mit der jeweiligen Power am nächsten Morgen. Die Diagonale ist hier, wenn auch nicht vollständig zu erkennen (Tabelle 53).

**Tabelle 53: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des Vigils am nächsten Morgen unter Teilnahme über der zentralen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		TotP_VG_T_C3	DP_VG_T_C3	TP_VG_T_C3	AP_VG_T_C3	BP_VG_T_C3	GP_VG_T_C3
TotP_N_C3	r=	0,402	0,387	0,446	0,490	0,311	0,037
	p=	0,110	0,125	0,073	0,046	0,224	0,889
DP_N_C3	r=	0,534	0,544	0,627	0,458	0,169	-0,025
	p=	0,027	0,024	0,007	0,064	0,516	0,926
TP_N_C3	r=	0,341	0,324	0,574	0,625	0,233	-0,078
	p=	0,181	0,205	0,016	0,007	0,368	0,765
AP_N_C3	r=	0,186	0,150	0,397	0,657	0,404	0,000
	p=	0,474	0,567	0,115	0,004	0,107	1,000
BP_N_C3	r=	0,110	0,032	0,174	0,547	0,478	0,142
	p=	0,673	0,903	0,504	0,023	0,052	0,586
GP_N_C3	r=	0,164	0,059	0,091	0,534	0,645	0,375
	p=	0,529	0,823	0,729	0,027	0,005	0,138

Auch für die okzipitale Power lässt sich ein ähnlicher Zusammenhang beschreiben. Es zeigt sich eine nicht ganz vollständige Diagonale in Tabelle 54. Es korrelieren nächtliche absolute Theta-, Alpha-, und Beta-Power mit der jeweiligen morgendlichen Power.

Insgesamt bleibt der Eindruck bestehen, dass sich die Powerspektren der Nacht mit den Powerspektren am Morgen ähneln. Unabhängig davon, ob die Probanden unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung standen, und auch unabhängig davon, ob bei den Probanden eher viel langsame Power oder viel schnelle Power gemessen wurden.

**Tabelle 54: Total-Power und absolute Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme über der okzipitalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		TotP_VG_T_O2	DP_VG_T_O2	TP_VG_T_O2	AP_VG_T_O2	BP_VG_T_O2	GP_VG_T_O2
TotP_N_O2	r=	0,189	-0,034	0,348	0,772	0,348	-0,169
	p=	0,468	0,896	0,171	0,000	0,171	0,516
DP_N_O2	r=	0,402	0,265	0,517	0,556	0,113	-0,196
	p=	0,110	0,305	0,034	0,020	0,667	0,451
TP_N_O2	r=	0,358	0,199	0,571	0,657	0,225	-0,176
	p=	0,158	0,445	0,017	0,004	0,384	0,498
AP_N_O2	r=	0,230	-0,012	0,424	0,816	0,473	-0,147
	p=	0,374	0,963	0,090	0,000	0,055	0,573
BP_N_O2	r=	0,078	-0,167	0,265	0,772	0,581	-0,015
	p=	0,765	0,523	0,305	< 0,000	0,014	0,955
GP_N_O2	r=	-0,059	-0,225	< 0,000	0,449	0,681	0,260
	p=	0,823	0,384	1,000	0,071	0,003	0,314

### 3.4.2. Relative Power während der Nacht und Power während des VigiMars am nächsten Morgen

Sowohl unter Belohnungsbedingung als auch unter Teilnahmebedingung zeigen sich über allen drei Ableitungen signifikante Korrelationen zwischen der Power der gleichen Lokalisationen in der Nacht und am nächsten Morgen während des VigiMars.

Unter Belohnungsbedingung korrelieren über der frontalen und der zentralen Ableitung alle relativen Powerwerte in der Nacht mit den zugehörigen relativen Powerwerten während des VigiMars. Graphisch imponiert dieser Zusammenhang als Diagonale in Tabelle 55 und 56.

**Tabelle 55: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung über der frontalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		rDP_VG_B_F4	rTP_VG_B_F4	rAP_VG_B_F4	rBP_VG_B_F4	rGP_VG_B_F4
rDP_N_F4	$r=$	0,774	-0,062	-0,571	-0,794	-0,776
	$p=$	< 0,000	0,820	0,021	< 0,000	< 0,000
rTP_N_F4	$r=$	-0,044	0,785	0,300	-0,065	-0,212
	$p=$	0,871	< 0,000	0,259	0,812	0,431
rAP_N_F4	$r=$	-0,574	0,579	0,932	0,438	0,129
	$p=$	0,020	0,019	< 0,000	0,090	0,633
rBP_N_F4	$r=$	-0,518	-0,168	0,324	0,609	0,632
	$p=$	0,040	0,535	0,222	0,012	0,009
rGP_N_F4	$r=$	-0,503	-0,300	0,044	0,632	0,776
	$p=$	0,047	0,259	0,871	0,009	< 0,000

**Tabelle 56: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung über der zentralen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		rDP_VG_B_C3	rTP_VG_B_C3	rAP_VG_B_C3	rBP_VG_B_C3	rGP_VG_B_C3
rDP_N_C3	$r=$	0,594	0,297	-0,226	-0,576	-0,471
	$p=$	0,015	0,264	0,399	0,019	0,066
rTP_N_C3	$r=$	0,232	0,791	0,253	-0,379	-0,656
	$p=$	0,387	0,000	0,345	0,147	0,006
rAP_N_C3	$r=$	-0,471	0,379	0,724	0,235	-0,109
	$p=$	0,066	0,147	0,002	0,380	0,688
rBP_N_C3	$r=$	-0,479	-0,371	0,144	0,676	0,432
	$p=$	0,060	0,158	0,594	0,004	0,094
rGP_N_C3	$r=$	-0,441	-0,635	-0,224	0,471	0,706
	$p=$	0,087	0,008	0,405	0,066	0,002

Über der okzipitalen Ableitung korrelieren außer der relativen Beta-Power wiederum alle relativen Powerwerte aus der Nacht mit der zugehörigen morgendlichen relativen Power während des VigiMars (Tabelle 57).

**Tabelle 57: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnung über der okzipitalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		rDP_VG_B_O2	rTP_VG_B_O2	rAP_VG_B_O2	rBP_VG_B_O2	rGP_VG_B_O2
rDP_N_O2	r=	0,509	0,179	-0,229	-0,397	-0,418
	p=	0,044	0,506	0,393	0,128	0,107
rTP_N_O2	r=	0,374	0,703	0,068	-0,700	-0,653
	p=	0,154	0,002	0,803	0,003	0,006
rAP_N_O2	r=	-0,406	0,268	0,709	-0,021	-0,391
	p=	0,119	0,316	0,002	0,940	0,134
rBP_N_O2	r=	-0,503	-0,256	0,185	0,412	0,435
	p=	0,047	0,339	0,492	0,113	0,092
rGP_N_O2	r=	-0,388	-0,326	0,015	0,521	0,597
	p=	0,137	0,217	0,957	0,039	0,015

Anhand der Tabellen 58 bis 60 kann man die statistischen Zusammenhänge der nächtlichen relativen Power mit der morgendlichen relativen Power während des VigiMars unter Teilnahmebedingung ablesen.

Über der frontalen Ableitung zeigen sich statistisch signifikante Korrelationen zwischen der nächtlichen relativen Theta-, Alpha- und Gamma-Power und der jeweiligen morgendlichen Power während des VigiMars (Tabelle 58). Für die zentrale Ableitung lassen sich signifikante Zusammenhänge zwischen jeder nächtlichen, relativen Power und der zugehörigen Power während des VigiMars erkennen (Tabelle 59). Auch hier imponiert graphisch eine vollständige Diagonale.

**Tabelle 58: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme über der frontalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		rDP_VG_T_F4	rTP_VG_T_F4	rAP_VG_T_F4	rBP_VG_T_F4	rGP_VG_T_F4
rDP_N_F4	$r=$	0,429	-0,130	-0,412	-0,478	-0,250
	$p=$	0,086	0,619	0,101	0,052	0,333
rTP_N_F4	$r=$	< 0,000	0,551	0,044	-0,238	-0,199
	$p=$	1,000	0,022	0,866	0,358	0,445
rAP_N_F4	$r=$	0,037	0,034	0,490	0,262	-0,213
	$p=$	0,889	0,896	0,046	0,309	0,411
rBP_N_F4	$r=$	-0,169	-0,150	0,370	0,473	0,088
	$p=$	0,516	0,567	0,144	0,055	0,736
rGP_N_F4	$r=$	-0,441	-0,172	-0,093	0,331	0,512
	$p=$	0,076	0,510	0,722	0,195	0,036

**Tabelle 59: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme über der zentralen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		rDP_VG_T_C3	rTP_VG_T_C3	rAP_VG_T_C3	rBP_VG_T_C3	rGP_VG_T_C3
rDP_N_C3	$r=$	0,740	0,005	-0,324	-0,748	-0,586
	$p=$	0,001	0,985	0,205	0,001	0,013
rTP_N_C3	$r=$	0,181	0,767	0,289	-0,213	-0,485
	$p=$	0,486	0,000	0,260	0,411	0,048
rAP_N_C3	$r=$	-0,510	0,314	0,554	0,556	0,032
	$p=$	0,037	0,220	0,021	0,020	0,903
rBP_N_C3	$r=$	-0,662	0,051	0,321	0,828	0,478
	$p=$	0,004	0,844	0,209	0,000	0,052
rGP_N_C3	$r=$	-0,547	-0,206	-0,027	0,578	0,760
	$p=$	0,023	0,428	0,918	0,015	0,000

Über der okzipitalen Ableitung korreliert lediglich die relative Beta-Power der Nacht positiv mit der relativen Beta-Power während des VigiMars (Tabelle 60).

**Tabelle 60: Relative Power in der Nacht und während des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahme über der okzipitalen Ableitung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		rDP_VG_T_O2	rTP_VG_T_O2	rAP_VG_T_O2	rBP_VG_T_O2	rGP_VG_T_O2
rDP_N_O2	r=	0,154	0,551	-0,086	-0,713	-0,306
	p=	0,554	0,022	0,743	0,001	0,232
rTP_N_O2	r=	0,047	0,473	0,015	-0,498	-0,184
	p=	0,859	0,055	0,955	0,042	0,480
rAP_N_O2	r=	-0,105	-0,054	0,211	0,360	-0,078
	p=	0,687	0,837	0,417	0,155	0,765
rBP_N_O2	r=	-0,066	-0,618	-0,152	0,591	0,390
	p=	0,801	0,008	0,560	0,013	0,122
rGP_N_O2	r=	-0,042	-0,730	-0,157	0,647	0,449
	p=	0,874	0,001	0,548	0,005	0,071

### 3.4.3. Total-Power und absolute Power während der Nacht und während des PSTs am nächsten Morgen

Die gemessene Total-Power und absolute Power während der Nacht zeigt keinen statistischen Zusammenhang zu der gemessenen Total- und absoluten Power derselben Lokalisation während des PSTs am nächsten Morgen.

Insgesamt ergeben sich hier uneinheitliche Ergebnisse. Die entsprechenden Tabellen finden sich im Anhang (Tabelle A46-51)

### 3.4.4. Relative Power während der Nacht und während des PSTs am nächsten Morgen

Die gemessene relative Power während der Nacht korreliert nicht signifikant mit der relativen Power derselben Lokalisation während des PSTs. Auch hierbei ergeben sich uneinheitliche Ergebnisse, die in den Tabellen A52-57 im Anhang zu finden sind.

### **3.5. Hirnelektrische Delta- und Theta-Power in der Nacht und am nächsten Morgen während der Tests**

Bezüglich der Fragestellung ob vermehrte Delta- und Theta-Power in der Nacht mit verminderter Delta- und Theta-Power während der Vigilanztests einhergehen, ergeben sich folgende Ergebnisse:

#### **3.5.1.Nächtliche Delta- und Theta-Power und morgendliche Delta- und Theta-Power während des VigiMars**

Den Tabellen 61 und 62 kann man entnehmen, dass sowohl unter Belohnungs- als auch unter Teilnahmebedingung die Delta- und Theta- Power der Nacht über frontal und okzipital oft signifikant positiv miteinander korrelieren. Je mehr absolute Delta- und Theta-Power in der Nacht, desto mehr absolute Delta- und Theta-Power am nächsten Morgen während des VigiMars. Dieser Zusammenhang lässt sich zwischen Delta- und Delta-Power, Theta- und Theta-Power, aber auch zwischen Delta- und Theta-Power erkennen.

Weiterhin fällt auf, dass oft Korrelationen zwischen frontalen und zentralen Ableitungen bestehen, die okzipitale Ableitung aber keinen statistischen Bezug zu den frontalen und zentralen Ableitungen aufweist(Tabelle 61-62).

Hohe absolute Delta- und Theta-Powern gehen also nicht, wie in Hypothese 3 (siehe Seite 15) formuliert, mit niedriger absoluter Delta- und Theta-Power, sondern sowohl unter Belohnung, als auch unter Teilnahme, mit hoher absoluter Delta- und Theta-Power am nächsten Morgen während des VigiMars einher.

**Tabelle 61: Absolute nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnungsbedingung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		DP_VG_B_F4	TP_VG_B_F4	DP_VG_B_C3	TP_VG_B_C3	DP_VG_B_O2	TP_VG_B_O2
DP_N_F4	r=	0,603	0,815	0,579	0,744	0,106	0,321
	p=	0,013	0,000	0,019	0,001	0,696	0,226
TP_N_F4	r=	0,429	0,750	0,506	0,759	0,124	0,318
	p=	0,097	0,001	0,046	0,001	0,649	0,231
DP_N_C3	r=	0,459	0,700	0,544	0,585	0,135	0,282
	p=	0,074	0,003	0,029	0,017	0,617	0,289
TP_N_C3	r=	0,297	0,591	0,456	0,441	0,206	0,394
	p=	0,264	0,016	0,076	0,087	0,444	0,131
DP_N_O2	r=	0,400	0,418	0,306	0,426	0,547	0,712
	p=	0,125	0,107	0,249	0,099	0,028	0,002
TP_N_O2	r=	0,229	0,276	0,229	0,429	0,703	0,885
	p=	0,393	0,300	0,393	0,097	0,002	< 0,000

**Tabelle 62: Absolute nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnungsbedingung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		DP_VG_T_F4	TP_VG_T_F4	DP_VG_T_C3	TP_VG_T_C3	DP_VG_T_O2	TP_VG_T_O2
DP_N_F4	r=	0,603	0,815	0,579	0,744	0,106	0,321
	p=	0,013	0,000	0,019	0,001	0,696	0,226
TP_N_F4	r=	0,429	0,750	0,506	0,759	0,124	0,318
	p=	0,097	0,001	0,046	0,001	0,649	0,231
DP_N_C3	r=	0,515	0,564	0,544	0,627	0,392	0,436
	p=	0,035	0,018	0,024	0,007	0,119	0,080
TP_N_C3	r=	0,419	0,569	0,324	0,574	0,118	0,169
	p=	0,094	0,017	0,205	0,016	0,653	0,516
DP_N_O2	r=	-0,061	0,174	-0,061	0,267	0,265	0,517
	p=	0,815	0,504	0,815	0,300	0,305	0,034
TP_N_O2	r=	-0,127	0,135	-0,125	0,248	0,199	0,571
	p=	0,626	0,606	0,633	0,338	0,445	0,017

Für die relative Power ergeben sich ebenfalls positive Korrelationen zwischen der Messung der Nacht und am nächsten Morgen während des VigiMars. Unter Belohnungsbedingung geht eine hohe, nächtliche relative Delta- Power statistisch signifikant mit einer hohen relativen Delta-Power während des VigiMars einher. Auch die relative nächtliche Theta-Power korreliert positiv mit der rela-



tiven Theta-Power während des VigiMars. Delta- und Theta-Powern korrelieren untereinander nicht statistisch bedeutsam (Tabelle 63).

**Tabelle 63: Relative nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des VigiMars am nächsten Morgen unter Belohnungsbedingung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		rDP_VG_B_F4	rTP_VG_B_F4	rDP_VG_B_C3	rTP_VG_B_C3	rDP_VG_B_O2	rTP_VG_B_O2
rDP_N_F4	r=	0,774	-0,062	0,550	-0,100	0,618	0,212
	p=	< 0,000	0,820	0,027	0,713	0,011	0,431
rTP_N_F4	r=	-0,044	0,785	0,262	0,706	0,350	0,271
	p=	0,871	< 0,000	0,327	0,002	0,184	0,311
rDP_N_C3	r=	0,376	0,179	0,594	0,297	0,674	0,435
	p=	0,151	0,506	0,015	0,264	0,004	0,092
rTP_N_C3	r=	-0,126	0,671	0,232	0,791	0,432	0,468
	p=	0,641	0,004	0,387	< 0,000	0,094	0,068
rDP_N_O2	r=	0,394	0,129	0,153	0,115	0,509	0,179
	p=	0,131	0,633	0,572	0,672	0,044	0,506
rTP_N_O2	r=	0,053	0,147	0,109	0,500	0,374	0,703
	p=	0,846	0,587	0,688	0,049	0,154	0,002

Dies gilt mit einer Ausnahme auch für die Delta- und Theta-Power unter Teilnahme. Auch hier zeigen sich statistisch bedeutsame Zusammenhänge zwischen der Delta-Power der Nacht und der Delta-Power am Tag sowie zwischen der Theta-Power in der Nacht und der Theta-Power am Tag.

Eine Abweichung hiervon ergibt sich aus der Korrelation der nächtlichen relativen Delta-Power okzipital mit der relativen Theta-Power frontal während des VigiMars.

Auch unter Teilnahmebedingung spricht viel Delta- und Theta- Power in der Nacht für viel Delta- und Theta-Power nächsten Morgen (Tabelle 64).

**Tabelle 64: Relative nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des VigiMars am nächsten Morgen unter Teilnahmebedingung**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		rDP_VG_T_F4	rTP_VG_T_F4	rDP_VG_T_C3	rTP_VG_T_C3	rDP_VG_T_O2	rTP_VG_T_O2
rDP_N_F4	r=	0,429	-0,130	0,664	-0,025	-0,105	0,025
	p=	0,086	0,619	0,004	0,926	0,687	0,926
rTP_N_F4	r=	< 0,000	0,551	0,392	0,439	0,211	0,221
	p=	1,000	0,022	0,119	0,078	0,417	0,395
rDP_N_C3	r=	0,338	-0,039	0,740	0,005	-0,243	-0,012
	p=	0,184	0,881	0,001	0,985	0,348	0,963
rTP_N_C3	r=	0,203	0,708	0,181	0,767	0,245	0,485
	p=	0,434	0,001	0,486	< 0,000	0,343	0,048
rDP_N_O2	r=	-0,284	0,522	-0,054	0,402	0,154	0,551
	p=	0,269	0,032	0,837	0,110	0,554	0,022
rTP_N_O2	r=	-0,294	0,488	-0,034	0,473	0,047	0,473
	p=	0,252	0,047	0,896	0,055	0,859	0,055

### 3.5.2. Nächtliche Theta- und Delta Power und morgendliche Theta- und Delta-Power während des PSTs

Unter Belohnungsbedingung ergeben sich signifikante Zusammenhänge zwischen der absoluten Delta- und Theta-Power der Nacht und der absoluten Delta- und Theta-Powern während des PSTs am nächsten Morgen.

Je mehr relative Delta- und Theta-Power in der Nacht, desto mehr Delta- und Theta-Power zeigt sich auch am nächsten Morgen während des PSTs. Es zeigen sich sowohl Zusammenhänge zwischen der Delta-Power der Nacht mit der Delta-Power während des PSTs als auch der Delta-Power in der Nacht und der Theta-Power während des PSTs. Vermehrte Theta-Power in der Nacht korreliert ebenso häufig mit vermehrter Theta- und Delta-Power während des PSTs (Tabelle 65).

Unter Teilnahmebedingung ergeben sich uneinheitliche nicht signifikante Ergebnisse (Tabelle 66).

**Tabelle 65: Absolute nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des PSTs am nächsten Morgen unter Belohnungsbedingung**  
(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $B$  = Belohnung)

		DP_P_B_F4	TP_P_B_F4	DP_P_B_C3	TP_P_B_C3	DP_P_B_O2	TP_P_B_O2
DP_N_F4	$r=$	0,503	0,738	0,241	0,350	0,332	0,353
	$p=$	0,047	0,001	0,368	0,184	0,208	0,180
TP_N_F4	$r=$	0,300	0,544	0,100	0,244	0,224	0,241
	$p=$	0,259	0,029	0,713	0,362	0,405	0,368
DP_N_C3	$r=$	0,335	0,521	0,262	0,453	0,294	0,350
	$p=$	0,204	0,039	0,327	0,078	0,269	0,184
TP_N_C3	$r=$	0,150	0,332	0,309	0,474	0,268	0,312
	$p=$	0,579	0,208	0,244	0,064	0,316	0,240
DP_N_O2	$r=$	0,356	0,700	0,359	0,576	0,494	0,509
	$p=$	0,176	0,003	0,172	0,019	0,052	0,044
TP_N_O2	$r=$	0,165	0,538	0,391	0,656	0,653	0,653
	$p=$	0,542	0,031	0,134	0,006	0,006	0,006

**Tabelle 66: Absolute nächtliche Delta- und Theta-Power und absolute Delta- und Theta-Power während des PSTs am nächsten Morgen unter Teilnahmebedingung**  
(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit,  $T$  = Teilnahme)

		DP_P_T_F4	TP_P_T_F4	DP_P_T_C3	TP_P_T_C3	DP_P_T_O2	TP_P_T_O2
DP_N_F4	$r=$	0,184	0,306	0,463	0,390	0,321	0,184
	$p=$	0,480	0,232	0,061	0,122	0,209	0,480
TP_N_F4	$r=$	0,150	0,407	0,309	0,468	0,257	0,125
	$p=$	0,567	0,105	0,228	0,058	0,319	0,633
DP_N_C3	$r=$	0,032	0,316	0,483	0,343	0,216	-0,002
	$p=$	0,903	0,216	0,050	0,178	0,406	0,993
TP_N_C3	$r=$	0,071	0,373	0,272	0,365	0,225	-0,012
	$p=$	0,786	0,141	0,291	0,149	0,384	0,963
DP_N_O2	$r=$	-0,306	-0,108	0,056	0,277	0,235	0,309
	$p=$	0,232	0,680	0,830	0,282	0,363	0,228
TP_N_O2	$r=$	-0,314	-0,078	0,020	0,424	0,265	0,461
	$p=$	0,220	0,765	0,940	0,090	0,305	0,063

Für die relativen Theta- und Delta-Power ergeben sich uneinheitliche, nicht signifikante Ergebnisse (Tabelle A58-59)

### 3.6. Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während der Tests unter Belohnungs- und Teilnahmebedingungen

Es lassen sich Unterschiede zwischen der hirnelektrischen Aktivität während der Tests unter Belohnungs- und Teilnahmebedingung beobachten. Hierbei zeigen sich signifikante Unterschiede für die Messung der absoluten Power.

Die Ergebnisse der Messung der relativen Power sind im Anhang dargestellt (Tabelle A60-64).

Unter Teilnahmebedingung ergeben sich während des VigiMars signifikant mehr Aktivität der Total-Power über frontal und okzipital als unter Belohnungsbedingung. Über der zentralen Ableitung zeigt sich kein bedeutsamer Unterschied (Tabelle 67). Die Total-Power während des PSTs unterscheidet sich für die Bedingungen Belohnung und Teilnahme nicht signifikant (Tabelle 68).

#### Tabelle 67: Unterschiede der Total-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
TotP_VG_F4	583,96	353,74	1095,98	7513,59 ± 28603,80	1091,05	580,26	1615,61	2897,48 ± 12629,84	0,006
TotP_VG_C3	264,75	201,96	559,85	472,07 ± 456,74	568,09	381,94	3149,63	2867,94 ± 12501,05	0,003
TotP_VG_O2	249,77	170,10	615,24	7132,62 ± 27307,83	498,33	259,47	1211,73	266,09 ± 1159,86	0,248
TotP_P_F4	293,66	111,93	587,81	6603,35 ± 26382,19	191,83	144,45	397,12	612,79 ± 2671,10	0,306
TotP_P_C3	120,54	88,83	191,36	153,83 ± 102,34	139,66	106,79	200,95	569,77 ± 2483,55	0,327
TotP_P_O2	73,76	54,64	158,31	1224,32 ± 4580,63	116,50	43,30	196,81	22,40 ± 97,65	0,647

Die Messung der absoluten Alpha-Power frontal und zentral während des VigiMars zeigt unter Teilnahme signifikant höhere Werte als unter Belohnungsbedingungen (Tabelle 68).

Während des PSTs zeigt sich allerdings eine signifikant größere absolute-Alpha Power okzipital unter Belohnung (Tabelle 69).

**Tabelle 68: Unterschiede der absoluten Alpha-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
AP_VG_F4	20,22	15,85	50,35	123,26 ± 386,81	32,13	19,75	66,68	181,39 ± 368,38	0,006
AP_VG_C3	20,16	13,99	44,15	35,15 ± 31,49	33,72	22,49	124,60	193,22 ± 371,31	0,002
AP_VG_O2	27,99	15,84	91,69	271,2 ± 847,73	33,94	18,41	70,65	47,64 ± 38,06	0,983
AP_P_F4	14,36	9,75	31,14	119,45 ± 428,16	10,41	6,66	31,13	33,15 ± 73,29	0,349
AP_P_C3	14,77	8,64	29,63	21,56 ± 20,16	14,14	6,19	51,35	38,88 ± 72,83	0,372
AP_P_O2	18,07	10,59	27,95	72,34 ± 188,46	12,81	4,94	29,31	20,32 ± 21,17	0,011

Unter Teilnahmebedingung zeigt sich während des VigiMars eine höhere absolute Beta-Power zentral. Tendenziell zeigt sich dies auch über der frontalen Ableitung.

Für den PST lassen sich bezüglich der Beta-Power keine signifikanten Unterschiede aufzeigen (Tabelle 69).

**Tabelle 69: Unterschiede der absoluten Beta-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
BP_VG_F4	50,50	38,67	113,13	118,25 ± 203,53	68,03	49,35	133,62	297,73 ± 619,0	0,053
BP_VG_C3	42,78	28,77	72,38	56,02 ± 39,78	53,53	44,36	98,14	258,17 ± 490,61	0,005
BP_VG_O2	41,09	34,55	76,38	220,11 ± 572,93	39,40	28,11	72,44	68,54 ± 68,60	0,744
BP_P_F4	34,59	12,28	73,56	110,31 ± 231,61	20,59	13,64	13,64	67,47 ± 110,58	0,215
BP_P_C3	15,83	9,20	27,70	18,92 ± 9,99	19,04	8,07	29,89	24,71 ± 25,27	0,557
BP_P_O2	11,97	8,23	31,18	42,19 ± 108,62	13,94	6,99	24,59	17,05 ± 12,51	0,586

Die Gamma-Power unterscheidet sich je nach Testbedingungen wie folgt: Unter Teilnahme ist die absolute Gamma-Power zentral und frontal während des VigiMars signifikant höher als unter Belohnung. Während des PSTs zeigt sich eine höhere absolute Gamma-Power frontal unter Belohnungsbedingungen (Tabelle 70).

**Tabelle 70: Unterschiede der absoluten Gamma-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
GP_VG_F4	103,83	38,61	201,78	243,52 ± 567,87	146,74	58,85	363,39	450,07 ± 146,74	0,012
GP_VG_C3	61,42	26,33	133,97	84,77 ± 76,54	111,35	41,33	376,84	366,98 ± 843,36	0,035
GP_VG_O2	52,61	28,98	102,95	702,74 ± 2565,20	82,21	34,04	101,66	182,13 ± 329,07	0,396
GP_P_F4	29,99	13,62	146,11	232,68 ± 604,26	22,50	9,67	80,41	115,61 ± 219,96	0,028
GP_P_C3	11,57	7,05	25,16	35,45 ± 71,73	10,09	7,02	37,36	31,47 ± 57,78	0,679
GP_P_O2	11,20	6,48	32,70	464,26 ± 1887,0	18,23	7,49	66,72	39,39 ± 53,64	0,983

Die absolute frontale und zentrale Delta-Power ist unter Teilnahme signifikant höher als unter Belohnung. Für den PST ergeben sich keine Unterschiede (Tabelle 71).

**Tabelle 71: Unterschiede der absoluten Delta-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
DP_VG_F4	349,93	176,02	747,29	6053,98 ± 23714,26	696,89	274,75	1042,53	3680,62 ± 9617,35	0,035
DP_VG_C3	126,28	90,32	242,57	230,01 ± 264,8	265,94	142,62	2047,56	3768,58 ± 9284,95	0,006
DP_VG_O2	72,01	48,81	292,89	4900,21 ± 19418,47	204,98	100,11	402,88	317,33 ± 329,67	0,446
DP_P_F4	124,38	51,22	267,47	5244,38 ± 21546,68	92,25	43,32	222,57	576,41 ± 1947,05	0,472
DP_P_C3	44,58	30,65	73,39	54,19 ± 36,99	62,32	28,81	75,36	482,44 ± 1843,21	0,231
DP_P_O2	15,53	11,68	23,60	439,79 ± 1625,23	14,83	10,21	33,78	34,23 ± 54,69	0,811

Während des VigiMars zeigt sich unter Teilnahmebedingungen zentral und frontal signifikant höhere, absolute Theta-Power, als unter Belohnungsbedingung. Die hirnelektrischen Messungen während des PSTs zeigen keine Unterschiede (Tabelle 72).

**Tabelle 72: Unterschiede der absoluten Delta-Power unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung während des VigiMars und des PSTs**

(Signifikante Ergebnisse werden grau unterlegt dargestellt;

$p$  = Irrtumswahrscheinlichkeit, VG = VigiMar, P = PST)

	Belohnung: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	Teilnahme: Median	1. Quartil	3. Quartil	MW±SD	p=
TP_VG_F4	31,49	23,43	95,25	441,82 ± 1648,10	57,80	31,69	208,40	433,27 ± 968,65	0,012
TP_VG_C3	25,01	15,50	48,49	36,28 ± 30,96	44,61	31,33	407,69	482,38 ± 1037,16	0,003
TP_VG_O2	16,12	8,98	56,05	774,91 ± 2946,23	28,78	14,78	72,63	217,23 ± 741,43	0,145
TP_P_F4	21,63	11,37	32,43	<b>395,10 ± 1564,38</b>	21,90	13,98	35,17	<b>93,63 ± 294,00</b>	0,948
TP_P_C3	13,32	10,23	24,87	<b>19,16 ± 15,10</b>	10,32	7,10	23,70	<b>14,12 ± 9,10</b>	0,679
TP_P_O2	7,25	5,14	13,45	<b>185,59 ± 748,78</b>	6,69	4,15	14,27	<b>12,88 ± 15,51</b>	0,711

## 4. Diskussion

### 4.1. Diskussion der Methoden

Unsere Probanden waren zur Zeit der Datenerhebung als studentische Hilfskräfte im Schlaflabor eingestellt. Hieraus ergab sich zwar eine relativ leichte Rekrutierbarkeit der Probanden, allerdings wurde hiermit auch eine von der Zusammensetzung her künstliche Gruppe untersucht. Die Probanden waren alle zwischen 21 und 30 Jahren alt und studierten Humanmedizin. Die Vergleichbarkeit mit der allgemeinen Bevölkerung ist daher nur bedingt gegeben. Da alle als Team von studentischen Hilfskräften zusammenarbeiteten, war es den Probanden möglich, sich über die Studie auszutauschen. Das strenge Geheimhalten der schon vorher vorbestimmten Testbedingungen war deshalb zum Ende der Studie nicht mehr möglich, sodass die Probanden eventuell schon ahnen konnten, dass sie einmal unter Belohnungsbedingung und einmal unter Teilnahmebedingung getestet wurden. Auch zweifelten einige der Probanden daran, dass die Gewinne tatsächlich ausgezahlt werden. Hierdurch könnte die Motivation einiger Probanden negativ beeinflusst worden sein.

Weiterhin ergaben sich Unterschiede bezüglich der Arbeitsbelastung während der Nächte. Die Tätigkeit als studentische Hilfskraft im Schlaflabor kann in anstrengenden Nächten sehr umfangreich sein, in ruhigeren Nächten aber auch die Möglichkeit zur Erholung bieten. Der Schlafentzug ist daher nicht einheitlich. Um die Erholung in der Nacht messbar zu machen, wurde deshalb ein nächtliches EEG aufgezeichnet und bei der Datenanalyse mitberücksichtigt. Im Schlaflabor angestellte MTAs, die über langjährige Erfahrung in der Auswertung von EEG-Aufzeichnungen verfügen, analysierten die nächtlichen EEG-Messungen und beurteilten sowohl die Schlafdauer, als auch die Schlafphasen während der Arbeitsnacht.

Trotz strenger Einhaltung der Testbedingungen ergaben sich technische Schwierigkeiten bei der Pupillometrie. Durch das Beschlagen der Infrarotbrille konnte die Pupille zeitweise nicht detektiert werden, sodass zumindest am Anfang der Studie einige Messungen abgebrochen und wiederholt werden mussten. Diese Problematik konnte allerdings bereits bei den Voruntersuchungen gelöst werden, sodass an den Testtagen mit EEG-Messung keine doppelten Messungen mehr vorkamen.



Das Anlegen der EEG-Elektroden erfolgte anhand der AASM-Leitlinie. Die Datenaufzeichnung erfolgte anhand von Standardprotokollen, die unter anderem Impedanzen von unter 5 k $\Omega$ , eine digitale Auflösung von mindestens 12-bit sowie empfohlene Samplingraten und Filterfrequenzen für die jeweiligen Signale festlegen. Dennoch wurden diese Bedingungen unter Umständen nicht immer genau eingehalten. Elektroden konnten sich während der Messung lockern. Da keine online Aufzeichnung erfolgte, konnte dies, falls es nicht durch die Probanden bemerkt wurde, nicht korrigiert werden. Die hiervon betroffenen Aufzeichnungen wurden bei unzureichender Qualität nicht mit in der statistischen Auswertung berücksichtigt. Wie bei allen medizintechnischen Messungen sind kleinere Artefakte der EEG-Aufzeichnungen dennoch nicht vollends auszuschließen.

Die Ausmessung der Elektrodenlokalisierungen erfolgte mit einem Maßband durch die Studienleiter. Hierbei wurden die Lokalisierungen gewissenhaft überprüft. Dennoch ergibt sich durch die Ausmessung per Hand eine weitere Fehlerquelle. Eine EEG-Aufzeichnung mittels EEG-Mütze ist vor allem bei der Aufzeichnung von Schlaf-EEGs allerdings als störanfälliger zu werten, da diese im Schlaf leichter verrutschen können. Eine Elektrode direkt auf der Kopfhaut zu befestigen ist hierbei aus unserer Sicht, trotz oben beschriebenen Fehlerquellen, die bessere Alternative.

Zur Berechnung der Powerspektren, wurden die Daten einzeln gesampelt, gefiltert, und hiernach die Power berechnet. Hierbei wurde ein standardisierter Ablaufplan eingehalten, um keine Arbeitsschritte zu vergessen. Nach jeder neuen Bearbeitung wurden die Dateien nach einer festen Vorgabe umbenannt. Dies hat den Vorteil, dass sich erfolgte Arbeitsschritte anhand der Benennung nachvollziehen ließen. Aufgrund der Vielzahl der Arbeitsschritte sind dennoch gewisse Fehlerquellen nicht auszuschließen. Durch eine Weiterentwicklung des Programmes edf-Trace könnten einige Arbeitsschritte zusammengefasst und automatisiert werden und hierdurch Fehlerquellen behoben werden. Besonders bei einer Folgestudie mit höherer Stichprobenzahl sollte dies in Betrachtung gezogen werden.

Bereits während der Studie wurden durch statistische Zwischenauswertungen in Form von Säulendiagrammen erste Tendenzen bewertet. Gravierende systematische Fehler wurden hierdurch höchst wahrscheinlich ausgeschlossen. Bei

der statistischen Analyse wurde auf robuste nichtparametrische Methoden zurückgegriffen. Dies erscheint aufgrund des explorativ-orientierenden Charakters dieser Untersuchung in Kombination mit der recht geringen Fallzahl als angemessen. Zudem wurde aus den gleichen Gründen auf eine Adjustierung des Alpha-Risikos für multiples, nicht unabhängiges Testen verzichtet. Dies bedeutet, dass wichtige Ergebnisse dieser Untersuchung der Replizierung durch unabhängige Untersuchungen bedürfen. Hier sollten größere Fallzahlen untersucht werden. Damit bestünde dann auch die Möglichkeit, komplexere statistische Methoden mit höherer Trennschärfe zu verwenden. So könnten z.B. Ausgangswerte der Vortestungen, auf die in dieser Untersuchung nicht zurückgegriffen wurde, in kovarianzanalytischen Analysen berücksichtigt werden, sodass habituelle interindividuelle Differenzen „herausgerechnet“ werden können. Hierzu sind allerdings deutlich größere Fallzahlen nötig und mathematische Voraussetzungen dieser Verfahren (Normalverteilung, Varianzenhomogenität in Untergruppen, Homoskedastizität) müssen gesichert sein bzw. durch Transformation der Rohdaten sichergestellt werden.

### **4.2. Diskussion der Ergebnisse**

#### ***Hirnelektrische Korrelate während der Vigilanztests***

Ein Ziel dieser Arbeit war es, Zusammenhänge zwischen hirnelektrischer Aktivität und Vigilanztestergebnissen darzustellen. Die Vigilanz nicht nur durch Testergebnisse, sondern auch durch im EEG sichtbare Korrelate zu untermauern, hätte eine bessere Objektivierbarkeit und Vergleichbarkeit auch verschiedener Vigilanztests untereinander zu Folge.

Die Idee, Vigilanz mit verschiedenen EEG-Frequenzen in Beziehung zu setzen, ist schon alt. In der Literatur finden sich einige Studien, bei denen während verschiedener Vigilanztests hirnelektrische Messungen aufgezeichnet wurden, um sie später bezüglich des Zusammenhangs zwischen Vigilanz und hirnelektrischer Aktivität zu analysieren. Den Ergebnissen der verschiedenen Studien liegen sehr unterschiedliche Testbedingungen zu Grunde. Bei einigen wurde die Vigilanz unter Schlafentzug getestet, bei anderen wurden ausgeschlafene Probanden untersucht. Teilweise wurden die Vigilanztestuntersuchungen nachts durchgeführt, meist aber tagsüber.

Auch im Probandenkollektiv existieren große Unterschiede, sodass man im Einzelfall eine Vergleichbarkeit kritisch prüfen muss.

Des Weiteren muss man bei dem Vergleich mit anderen Studien die Unterschiede der verschiedenen Vigilanztests beachten. Hierbei ist von unterschiedlichen Längen, als auch unterschiedlichen Intensitäten auszugehen. Manche langen Vigilanztests gelten im Gegensatz zu kürzeren Tests als sehr monoton. Manche Tests motivieren die Probanden durch einen eher interaktiven Charakter. Bei einigen Vigilanztests gibt es visuelle oder auditorische Signale, die eine Art Arousal zur Folge haben können.

Auch die Art der kognitiven Beanspruchungen durch die verschiedenen Tests dürfte sich vermutlich hirnelektrisch widerspiegeln. Es gibt Tests, bei denen der Proband durch verschiedenste Aufgabenstellungen eine gewisse Denkarbeit leisten muss. Einige Vigilanztest regen vor allem visuelle Prozesse an, es gibt aber auch auditorische Vigilanztests.

Darüber hinaus sind beim Vergleich unserer Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Studien die außergewöhnlichen Testbedingungen durch erstens Schlafentzug und zweitens den bei jeweils einer Gruppe bestehenden monetären Anreiz unter Belohnungsbedingung zu berücksichtigen.

In unserer Studie wurde der Zusammenhang hirnelektrischer Korrelate bezüglich des VigiMars und des PSTs jeweils unter Belohnungs- und unter Teilnahmebedingung untersucht. Diese Testbedingungen sind in der Literatur bisher einzigartig.

### *Hirnelektrische Korrelate während des VigiMars:*

Es konnte gezeigt werden, dass eine hohe Total-Power, also die Summe aller absoluten Power-Werte mit höherer Vigilanz während des VigiMars einhergeht. Bisher wurden in wenigen Studien Zusammenhänge zwischen der Total-Power und Vigilanz beschrieben.

Lediglich bei Corsi-Cabrera et al. findet man einen Anstieg der Total-Power nach Schlafentzug sowie einen Zusammenhang längerer Reaktionszeiten eines Vigilanztests und dem Anstieg der Total-Power (Corsi-Cabrera et al. 1996). Diese Ergebnisse verhalten sich zu unseren Ergebnissen also genau entgegengesetzt. Da die Total-Power die Summe aller Frequenzen beinhaltet, finden sich in ihr sowohl langsame, als auch schnelle Frequenzen wieder. Die Interpretation

der Total-Power ist daher schwierig. Die Berechnung der Total-Power macht dennoch insofern Sinn, als dass sie Referenzwerte für die Berechnung der relativen Powerbanden liefert. Weitere Zusammenhänge lassen sich allerdings besser anhand der verschiedenen Banden erkennen.

Wie erwartet geht eine hohe relative Alpha-Power mit einer niedrigeren Vigilanz einher. Wie Belyavin bereits 1987 postulierte, nimmt die Alpha-Aktivität bei geöffneten Augen und zunehmender Müdigkeit zu (Belyavin und Wright 1987). Da es sich bei dem Marburger VigiMar um einen visuellen Reaktionszeittest handelt, mussten die Probanden während des Tests die Augen geöffnet lassen, sodass sich unsere Ergebnisse hier kongruent zu den Ergebnissen von Belyavin et al. zeigen. Auch in vielen anderen Studien konnte eine zunehmende Alpha-Aktivität mit einer niedrigeren Vigilanz assoziiert werden (Neu et al. 2015), (Kaida et al. 2007), (Kamzanova et al. 2014), (Otmani et al. 2005).

In der vorliegenden Studie konnte weiterhin der Zusammenhang zwischen höherer absoluter Beta- und Gamma-Aktivität und besseren Testergebnissen beim VigiMar, also einer höheren Vigilanz gezeigt werden. Wie im Vorhinein vermutet, gehen schnellere EEG-Frequenzen mit höherer Aufmerksamkeit einher.

Auch Neu et al. beobachtete 2014 einen Zusammenhang zwischen einer höheren Einschlafneigung bei weniger Beta-Aktivität und schlechtere Vigilanztestergebnisse bei wenig Gamma-Aktivität (Neu et al. 2015). Wie Neu et al. beschrieb Belyavin et al. bereits 1987 einen Zusammenhang zwischen niedriger Beta-Aktivität und höheren Fehlerraten bei einem einfachen 30 minütigem visuellen Vigilanztest.

Andere Autoren beschreiben ein Ansteigen der Beta-Aktivität bei zunehmender Testdauer und zunehmender Müdigkeit, und deuteten dieses Ansteigen als Versuch des Gehirns wieder eine höheren Vigilanz zu erreichen (Lorenzo et al. 1995), (Craig et al. 2012). Diese Hypothese konnte sich bei unserer Analyse der hinrelektischen Korrelate während der Tests nicht bestätigen.

In unserer Studie führten 20 Probanden den VigiMar unter unterschiedlichen Testbedingungen (Belohnungs- und Teilnahmebedingung) durch. Die Ergebnisse zur Messung der Alpha-Aktivität zeigten keinen Unterschied zwischen beiden Testbedingungen. Bei der Beta- und Gamma-Aktivität waren es vor allem die Messungen unter Belohnungsbedingung die einen Zusammenhang zwischen

hoher Beta- und Gamma-Power und hoher Vigilanz zeigten. Der Effekt der schnelleren Frequenzen scheint also auch mit dem Motivationsgrad zusammenzuhängen. Unter Teilnahmebedingung waren gute Testergebnisse und hohe Gamma- und Beta-Aktivität nicht assoziiert.

Dies passt zu den schlechteren Testergebnissen bei dem VigiMar unter Teilnahmebedingung (Thomas et al. 2015). Es ist durchaus vorstellbar, dass bei einem so langen (90-minütigem), monotonen Vigilanztest unter Teilnahmebedingung nach Schlafentzug die Probanden weniger vigilant waren und die Motivation, die Vigilanz zu steigern, eher gering war.

Bezüglich der Delta-Power fanden wir überraschender Weise einen Zusammenhang zwischen höherer absoluter Delta-Aktivität und einer höheren Vigilanz während des VigiMars. Unter Belohnungsbedingung konnten wir einen stärkeren Effekt beobachtet, aber auch unter Teilnahmebedingung zeigten sich hier ähnliche Tendenzen. In der Literatur sind relativ wenige und uneinheitliche Aussagen über den Zusammenhang zwischen Delta-Aktivität und Vigilanz zu finden.

Neu et al. fand je nach Testbedingung (Grad des Schlafentzugs) den Zusammenhang zwischen erhöhter Schläfrigkeit und niedriger Delta-Aktivität, aber bei stärkerem Schlafentzug, erhöhte Delta-Aktivität bei stärkerer Schläfrigkeit (Neu et al. 2015).

Minkwitz et al. beschreibt schlechtere Reaktionszeiten bei einem einfachen 15 minütigem visuellen Vigilanztest und höherer Delta, als auch höherer Theta-Aktivität.

Da eine hohe Delta-Aktivität vor allem während der Tiefschlafphase zu erwarten ist, würde man während der Vigilanztestung grundsätzlich eher wenig Delta-Aktivität erwarten, da während der Testung durch Videoüberwachung sichergestellt wurde, dass die Probanden nicht einschlafen. Dieses Ergebnis zu interpretieren, fällt daher schwer.

Die relative Theta-Power ging sowohl unter Belohnungs- als auch unter Teilnahmebedingung mit niedriger Vigilanz einher. Starke Müdigkeit, im Sinne von vermehrter Theta-Power (in diesem Zusammenhang keinesfalls als Tiefschlaf-Theta zu interpretieren), scheint also unabhängig der Testbedingung mit schlechten Vigilanztestergebnissen assoziiert zu sein.

Eine hohe Theta-Aktivität bei schlechten Vigilanztestergebnissen ist bereits durch verschiedene andere Studien beschrieben ((Chua et al. 2014b), (Caldwell et al. 2003), (Minkwitz et al. 2011), (Otmani et al. 2005), (Lorenzo et al. 1995), (Gevins et al. 1977), (Belyavin und Wright 1987)). Trotz unterschiedlichster Testbedingungen scheint dieser Parameter sehr geeignet zu sein, um niedrige Vigilanz hirnelektrisch darzustellen.

Insgesamt lassen sich auch während des bisher noch nicht auf hirnelektrische Korrelate untersuchten VigiMars Zusammenhänge zwischen hoher Alpha- und Theta-Aktivität und niedriger Vigilanz, sowie hoher Delta-, Beta- und Gamma-Aktivität und höherer Vigilanz beschreiben. Es zeigen sich mit Ausnahme der Delta-Aktivität kongruente Ergebnisse zu bereits vielen älteren aber auch neueren Studien.

### *Hirnelektrische Korrelate während des PSTs:*

Insgesamt zeigten sich weniger signifikante Zusammenhänge zwischen der hirnelektrischen Aktivität und der Vigilanz während des PSTs, als während des VigiMars. Im Vergleich zu dem langen, 90 minütigen VigiMar handelt es sich bei der Pupillometrie um einen verhältnismäßig kurzen, 11 minütigen Test. Hirnelektrische Korrelate sind wahrscheinlich aufgrund der Kürze der Testdauer schwieriger zu erfassen, als bei dem langen Vigilanztest VigiMar.

Kongruent zu den Ergebnissen des VigiMar geht eine hohe Total-Power unter Belohnungsbedingung mit besseren Testergebnissen bei dem PST einher.

Die Messung der Alpha-Aktivität ergibt keine signifikanten Zusammenhänge zu den Testleistungen.

Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen höherer Aktivität der absoluten okzipitalen Beta- und Gamma-Power und einem niedrigen Pupillenunruheindex, also einer höheren Vigilanz. Diese Ergebnisse entsprechen in etwa unseren Ergebnissen bezüglich des Zusammenhangs zwischen hoher Beta- und Gamma-Aktivität und einer höheren Vigilanz während des VigiMars. Bei dem VigiMar lässt sich die hohe Beta- und Gamma-Aktivität während höherer Vigilanz über verschiedenen Hirnlokalisationen beobachten, bei der Pupillometrie ist die hohe Beta- und Gamma-Aktivität während eines niedrigen Pupillenunruheindex vor allem auf die okzipitalen Hirnareale beschränkt. Dies könnte mög-

licherweise durch die sehr stark visuelle Ausrichtung während der Pupillometrie zu erklären sein. Da die visuelle Verarbeitung vor allem in der okzipitalen Sehrinde stattfindet, könnte die dort gemessene hohe Beta- und Gamma-Aktivität ein Äquivalent für eine dort gesteigerte hirnelektrische Aktivität sein.

Beide langsamen Frequenzbanden, Delta- und Theta-Power korrelieren nicht mit der Vigilanz während des PSTs.

Der Zusammenhang zwischen hirnelektrischer Aktivität und dem Pupillenunruheindex wurde bisher nur in drei Studien untersucht.

Schröder et al. führten 1999 eine vergleichbare Studie durch. Insgesamt führten sie 10 verwertbare Messsequenzen mit EEG-Aufzeichnungen während der Pupillometrie durch. Auf eine statistische Auswertung wurde aufgrund der geringen Fallzahl verzichtet. Insgesamt konnte hier eine Zunahme der Alpha-Aktivität bei einem hohen Pupillenunruheindex beobachtet werden (Schröder et al. 2005).

Böhning et al. untersuchten 10 Patienten mit obstruktiver Schlafapnoe und fanden höhere Alpha-Aktivität beim gleichzeitigen Auftreten von sogenannten Ermüdungswellen während der Pupillometrie. Es waren aber auch spontane Alpha-Aktivitäten ohne Korrelation zu den PST-Kriterien gefunden worden. Schröder et al. und Böhning et al. führten Messungen bei kranken Probanden ohne Schlafentzug durch. Beide Male konnten nur 10 Messungen analysiert werden, sodass es sich aufgrund der niedrigen Fallzahlen lediglich um deskriptive Ergebnisse handelt. Nähere Einzelheiten der Studien ließen sich nicht in Erfahrung bringen, da bei beiden Studien die Ergebnisse nur in Form eines Abstracts veröffentlicht wurden.

Die Ergebnisse unserer Studie lassen sich gut mit den Ergebnissen von Regen et al. vergleichen, die 2013 zum ersten Mal die Zusammenhänge verschiedener EEG-Frequenzen und dem Pupillenunruheindex beschrieben (Regen et al. 2013).

Regen et al. untersuchten 2013 24 gesunde Probanden unter 40 Stunden Schlafentzug. Wie bei der vorliegenden Studie wurde ein Wach-EEG aufgezeichnet und mit den Leistungen während der Pupillometrie verglichen. Während der 40 Stunden Schlafentzug von morgens 6 Uhr bis 0 Uhr des Folgetages wurde alle 2 Stunden eine Pupillometrie durchgeführt. Bei der Auswertung der Powerspektren konnte ein Zusammenhang zwischen einem hohen Pupillenunruheindex und hoher Alpha 1- (8,5-10 Hz), Delta- und Theta- Aktivität beobach-

tet werden. Regen et al. beschreibt also den Zusammenhang zwischen niedriger Vigilanz und langsamen EEG-Frequenzen, während unsere Ergebnisse vor allem den Zusammenhang zwischen hoher Vigilanz und schnellen EEG-Frequenzen abbilden. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie ist bei Regen et al. von einer insgesamt größeren Schläfrigkeit, also niedriger Vigilanz auszugehen. Dies könnte eine insgesamt höhere Aktivität der langsameren Frequenzen bedeuten. Da unsere Probanden nur partiellem Schlafentzug ausgesetzt waren, sind im Vergleich zu der Studie von Regen et al. eine höhere Vigilanz und hirnelektrisch eher schnellere Frequenzen während des PSTs zu erwarten. Dies spiegelt sich anhand der Ergebnisse wieder.

Regen et al. beschreibt den Zusammenhang zwischen niedriger Vigilanz und langsamen Frequenzen, wir beschreiben den Zusammenhang zwischen hoher Vigilanz und schnelleren Frequenzen.

Insgesamt zeigen sich trotz der unterschiedlichen Grade des Schlafentzugs inhaltlich vergleichbare Aussagen.

Merrit et al. führte 2004 eine weitere vergleichbare Studie durch. Hierbei wurden 16 Patienten mit Narkolepsie, 16 Patienten mit Obstruktiver Schlafapnoe und 16 gesunde Probanden bezüglich des Zusammenhangs zwischen hirnelektrischer Aktivität und dem Pupillendurchmesser untersucht. Die Testung dauerte hierbei 15 Minuten, also etwas länger als unser 11 minütiger PST. Hierbei konnte eine Zunahme der Theta-Aktivität bei größerem Pupillendurchmesser beobachtet werden. Dieser Effekt zeigte sich allerdings nur bei den kranken Probanden, bei den Gesunden war keine höhere Theta-Power bei größerem Pupillendurchmesser erkennbar.

Merrit et al. gingen davon aus, dass bei gesunden Probanden keine so niedrige Vigilanz während der Testung entsteht, sondern dass gesunde Probanden in der Lage sind, eine relativ hohe Vigilanz über 15 Minuten aufrecht zu erhalten. Auch unsere Probanden schienen während des PSTs keine so niedrige Vigilanz entwickelt zu haben wie die Probanden bei Regen. et al. unter 40 stündigem Schlafentzug. Die Vergleichbarkeit der Messparameter Pupillendurchmesser und Pupillenunruheindex ist allerdings begrenzt. Während der Pupillendurchmesser mit zunehmendem Alter kontinuierlich abnimmt, sind für den Pupillenunruheindex keine altersabhängigen Unterschiede beschrieben (Wilhelm et al. 2001).



Dennoch zeigt sich bei Merritt et al. wie in unserer Studie kein Zusammenhang zwischen Theta-Aktivität und Vigilanz während der Pupillographie (Merritt et al. 2004).

Zu den vorliegenden Zusammenhängen zwischen hoher Beta- und Gamma- und Aktivität und einer höheren Vigilanz während des PST, lassen sich in den bisher durchgeführten Pupillometriestudien keine kongruenten Ergebnisse finden. Aufgrund der geringen Anzahl an Studien zu hirnelektrischen Äquivalenten während des PSTs ist dies aber nicht verwunderlich.

Der PST ist im weiteren Sinne natürlich auch als visueller Vigilanztest zu werten und kann daher auch wie der VigiMar mit zahlreichen anderen Vigilanzteststudien verglichen werden. Wie bereits beschrieben beobachtete Neu et al. 2014 einen Zusammenhang zwischen einer höheren Einschlafneigung bei weniger Beta-Aktivität und schlechtere Vigilanztestergebnisse bei wenig Gamma-Aktivität (Neu et al. 2015).

Auch Belyavin et al. beschrieb bereits 1987 einen Zusammenhang zwischen niedriger Beta-Aktivität und höheren Fehlerraten bei einem einfachen 30 minütigen visuellen Vigilanztest. Die Ergebnisse dieser beiden Studien, als auch der vorliegenden Studie, beschreiben also den Zusammenhang zwischen niedriger Vigilanz und niedriger Beta- und Gamma-Aktivität. Diese Ergebnisse entsprechen dem allgemeinen Verständnis von schnelleren EEG-Frequenzen und einer wacheren zentralnervösen Aktivität, sowie langsameren Frequenzen und geringerer Vigilanz.

### ***Zusammenhang zwischen der nächtlichen, elektrischen Hirnaktivität (in der Nacht vor der Vigilanztestung) und den Testleistungen am nächsten Morgen***

#### *Nächtliche elektrische Hirnaktivität und Testleistung beim VigiMar*

Es konnte ein bedeutsamer Zusammenhang zwischen einer hohen nächtlichen, relativen Beta-Aktivität und schlechteren Testergebnissen während des VigiMars am nächsten Morgen gezeigt werden. Eine größere zentralnervöse Aktivität in Form von schnelleren Frequenzen in der Nacht, scheint also zu einer größeren Müdigkeit und niedriger Vigilanz am nächsten Morgen zu führen. Dieser

Zusammenhang gilt unter Belohnungsbedingung, nicht unter Teilnahmebedingung. Denkbar ist, dass die Probanden unter Teilnahmebedingung aufgrund der geringeren Motivation insgesamt schlechtere Ergebnisse beim VigiMar erzielten, unabhängig davon ob sie in der Nacht zuvor mehr oder weniger wach waren.

Weiterhin konnte ein Zusammenhang zwischen höherer absoluter und relativer Delta-Aktivität und besseren Ergebnissen beim VigiMar gezeigt werden. Sowohl unter Belohnungs- als auch unter Teilnahmebedingung zeigt sich dieser Zusammenhang zwischen geringerer zentralnervöser Aktivierung in der Nacht und höherer Vigilanz am nächsten Morgen über den frontalen, zentralen und okzipitalen Ableitungen.

Ein ähnlicher Zusammenhang konnte für die Theta-Power gefunden werden. Bei viel Theta-Aktivität in der Nacht, konnten bessere Testergebnisse beim VigiMar am nächsten Morgen erzielt werden. Hier zeigten sich allerdings keine signifikanten Korrelationen, dennoch weisen die Absolutwerte der Korrelationen auf den beschriebenen Zusammenhang hing.

Die Ergebnisse entsprechen hierbei unseren Erwartungen. Probanden, die sich in der Nacht besser erholen können, erzielen beim VigiMar bessere Ergebnisse.

### *Nächtliche elektrische Hirnaktivität und Testleistung beim PST*

Es zeigen sich statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen der nächtlichen, hirnelektrischen Aktivität und der Testleistung beim PST am nächsten Morgen. Diese Zusammenhänge zeigen sich bezüglich des PSTs nur unter Belohnungsbedingung. Eine hohe nächtliche absolute Beta-Aktivität sowie eine hohe absolute und relative Gamma-Aktivität gehen mit einer schlechteren Leistung beim PST einher. Es zeigen sich Korrelationen zwischen hoher Beta- und Gamma-Aktivität über die gesamte Nacht und einem hohen Pupillenunruheindex am nächsten Morgen.

Für die langsamen Frequenzen ergeben sich entgegengesetzte Ergebnisse. Eine hohe absolute und relative Delta-Aktivität in der Nacht gehen signifikant mit besseren Testleistungen während des PSTs einher. Auch eine hohe relative Theta-Aktivität korreliert mit einem niedrigeren Pupillenunruheindex am nächsten Morgen. Die Probanden hatten in der Nacht circa 1-3 Stunden Zeit sich zu erholen. Es ist also plausibel, dass in weniger arbeitsintensiven Nächten mehr Ru-

hephasen vorhanden waren, während in anderen Nächten bei höherer Arbeitsbelastung weniger möglich waren.

Eine höhere zentralnervöse Aktivierung in der Nacht scheint zu ermüden und zu schlechteren Leistungen, also niedrigerer Vigilanz am nächsten Morgen zu führen. Eine höhere Theta- und Delta-Aktivität in der Nacht führen scheinbar zu höherer Vigilanz am nächsten Morgen.

Zusammenfassend lässt sich ein Zusammenhang zwischen einer niedrig-frequenten Hirnaktivität in der Nacht und einer höheren Vigilanz am nächsten Morgen aufzeigen. Schnellere Frequenzen, die eine höhere zentralnervöse Aktivierung widerspiegeln, gehen mit Müdigkeit und schlechteren Ergebnissen beim VigiMar und PST einher.

Besonders beim PST spielte auch die Testbedingung eine große Rolle. Es ist denkbar, dass sich die oben beschriebenen Zusammenhänge deutlicher unter Belohnungsbedingung zeigen. Die Motivation, sich bei dem nur 11 minütigen PST aufgrund eines monetären Anreizes besonders anzustrengen, ist denkbar hoch. Die Unterschiede der Vigilanz könnten durch diese Motivation eventuell besonders gut sichtbar gemacht worden sein.

Unter Teilnahmebedingungen strengten sich die Probanden weniger an. Die Testergebnisse waren insgesamt schlechter, unabhängig von den möglichen Ruhephasen in der Nacht.

Es ist davon auszugehen, dass Probanden mit höherer Beta- und Gamma-Aktivität in der Nacht unter ausgeprägterem Schlafentzug standen, als die Probanden mit höherer Delta- und Theta-Aktivität. Der Zusammenhang zwischen Schlafentzug und Testleistungen bei Vigilanztests ist in vielen Studien untersucht worden. Die Annahme, dass längerer Schlafentzug zu schlechteren Testleistungen bei Vigilanztests führt, wurde durch viele Studien belegt (Lorenzo et al. 1995, Cajochen et al. 1999, Corsi-Cabrera et al. 1996, Craig et al. 2012, Hoedlmoser et al. 2011, Regen et al. 2013, Otmani et al. 2005)

Da auch eine höhere Beta- und Gamma-Aktivität als längerer Schlafentzug und eine höhere Delta- und Theta-Aktivität als geringer Schlafentzug der Probanden gewertet werden kann, zeigen sich unsere Ergebnisse hier konsistent zu allen oben genannten Studien, bei denen bei zunehmendem Schlafentzug eine niedrigere Vigilanz bei verschiedensten Vigilanztests gemessen wurden.

Der Zusammenhang zwischen der hirnelektrischen Aktivität in der Nacht und den Vigilanztestergebnissen am nächsten Morgen ist allerdings nach unserer Literaturrecherche einzigartig. In den oben genannten Studien wurden lediglich die hirnelektrische Aktivität während der Tests untersucht oder die Veränderung der hirnelektrischen Aktivität bei zunehmendem Schlafentzug.

Signal et al. untersuchten 2009 28 Fluglotsen während 4 Nachtschichten. Während die eine Gruppe eine Schlafpause von 40 Minuten wahrnehmen durfte, musste die andere Gruppe ohne Pause durcharbeiten. Bei einer Schlaflatenz von 19 Minuten kamen die Teilnehmer auf eine durchschnittliche Schlafdauer von 18 Minuten. Die Probanden mit kurzem „power nap“ zeigten bessere Testergebnisse bei dem psychomotorischen Vigilanztest in der letzten Stunde der Nachtschicht. Auch hierbei kam es also zur Vigilanzsteigerung durch eine zwischenzeitliche Schlafphase während der Nachtschicht (Signal et al. 2009). Die hirnelektrische Aktivität in der Nacht wurde hierbei jedoch nicht mit den Testergebnissen der Vigilanztests verglichen, sodass ein Vergleich mit unseren Ergebnissen nur bedingt erfolgen kann.

### ***Nächtliche hirnelektrische Aktivität und morgendliche hirnelektrische Aktivität während der Tests***

Entgegen unserer Hypothese gingen schnelle Frequenzen in der Nacht, im Sinne einer höheren Aktivität der Probanden, nicht mit langsameren Frequenzen während der Tests einher. Auch der umgekehrte Zusammenhang zwischen langsameren Frequenzen in der Nacht, im Sinne einer eventuell längeren Schlaf- oder Ruhephase und schnelleren Frequenzen während der Vigilanztests am Morgen konnte nicht gezeigt werden.

Vielmehr zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Frequenzen in der Nacht und derselben Frequenzen am nächsten Morgen. Sowohl über der frontalen, zentralen und auch der okzipitalen Ableitung zeigten sich deutlich signifikante positive Korrelationen zwischen der Total-, Alpha-, Beta-, Gamma-, Theta- und Delta-Power in der Nacht und am nächsten Morgen. Für die absoluten nächtlichen Powerwerte der einzelnen Frequenzen konnte vor allem eine positive Korrelation mit den absoluten Powerwerten während des VigiMars beobachtet werden.

Für die relativen Powerwerte konnten die Zusammenhänge zwischen der nächtlichen Power und der Power während beider Tests (VigiMar und PST) gezeigt werden. Viel Total-Power-Aktivität in der Nacht korrelierte mit viel Total-Power-Aktivität am nächsten Morgen, viel nächtliche Alpha- mit viel Alpha-, viel Beta- mit viel Beta-, viel Gamma- mit viel Gamma-, viel Theta- mit viel Theta- und viel nächtliche Delta-Aktivität mit viel morgendlicher Delta-Aktivität. Was sich zeigt sind also sehr ähnliche Powerspektren während der Nacht und am nächsten Morgen.

Da unsere Probanden während der Nacht als studentische Hilfskräfte im Schlaflabor gearbeitet haben, handelt es sich bei der Nacht vor den morgendlichen Testungen um partiellen Schlafentzug mit einer Unterbrechung von 1 bis 3 Stunden möglicher Schlafpause. Vor Dienstbeginn hatten die Probanden die Möglichkeit zu schlafen, es wurde diesbezüglich keine Regel aufgestellt. Es ist denkbar, dass der partielle im Vergleich zu den in vielen anderen Studien ausgeprägte Schlafentzug, trotz subjektiver starker Müdigkeit der Probanden keine signifikanten Änderungen der einzelnen Frequenzen zur Folge hatte.

Der Vergleich nächtlicher EEG-Frequenzen unter partiellem Schlafentzug mit EEG-Frequenzen während der Vigilanztests am nächsten Morgen ist bisher in der Literatur einzigartig. In vielen Studien wurde vor allem die Änderung der Powerspektren über die Zeit des zunehmenden Schlafentzugs gemessen.

Chua et al. untersuchte 2014 interindividuelle Unterschiede der Hirnaktivität nach Schlafentzug. 12 männliche Probanden im Alter von 22 bis 30 Jahren wurden in einem Abstand von 2,5 Monaten unter 26 stündigen Schlafentzug gestellt. Vergleichbare Bedingungen wurden hierbei durch Schlafprotokolle und Fragebögen sichergestellt. Es zeigten sich interindividuelle Unterschiede der Delta- Theta, Alpha-, und Beta-Aktivität, die nach 2,5 Monaten und gleichem Schlafentzug reproduzierbar waren (Chua et al. 2014a).

In einer anderen Studie aus demselben Jahr unterschieden Chua et al. für Schlafentzug vulnerable und resiliente Probanden. Die vulnerablen Probanden hatten schon unter ausgeruhten Testbedingungen eine höhere Delta und Theta-Aktivität als die resilienten Probanden (Chua et al. 2014b).

In der vorliegenden Studie hatten Probanden mit einer hohen Delta- und Theta-Aktivität in der Nacht auch eine hohe Delta- und Theta- Aktivität während der

Tests. Man könnte also annehmen, dass diese Probanden eine Gruppe von eher für Schlafentzug sensiblen Individuen bildete.

Probanden mit hoher Beta- und Gamma- Aktivität in der Nacht hatten auch am nächsten Morgen eine hohe Beta- und Gamma-Aktivität während der Tests.

Es ist anzunehmen, dass diese Ergebnisse bei längerem Schlafentzug nicht mehr zu erheben sind, da hierbei auch bei resilienten Probanden ein stärkerer Anstieg der Delta- und Theta-Aktivität einsetzen müsste. Anhand unserer Ergebnisse stellt sich dennoch die Frage, ob es nicht sinnvoll sein könnte, grundsätzlich Baseline-EEGs aufzuzeichnen, um hiernach eine Art Nettozunahme oder -abnahme der einzelnen Powerspektren zu messen und hierdurch eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen individuellen hirnelektrischen Aktivitäten herzustellen.

### ***Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während der Tests unter Belohnungs- und Teilnahmebedingungen***

Durch eine Belohnungssumme von bis zu 400 Euro setzten wir die Probanden während einer Testung unter Belohnungsbedingung. Während der anderen Testung erhielten die Probanden einen festen Stundenlohn, den sie durch ihre Leistung nicht steigern konnten.

### ***Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während des VigiMars unter Belohnungs- und Teilnahmebedingung***

Während des VigiMars zeigte sich unter Teilnahmebedingung über der frontalen und zentralen Ableitung eine signifikant höhere Total Power. Diese höhere Total-Power setzt sich aus Powerwerten aller Frequenzbereiche zusammen. So fanden wir überraschender Weise unter Teilnahmebedingung eine höhere absolute Alpha-, Beta-, und Gamma-Aktivität, aber auch eine höhere absolute Delta- und Theta-Aktivität.

Insgesamt zeigt sich also eine höhere Gesamtaktivität aller Powerbanden unter Teilnahmebedingung. Ein anderer Teil unserer Studie bezog sich im Wesentlichen auf die Analyse der Testergebnisse. „Zusammenfassend zeigen sich unter Belohnungsbedingung signifikant geringere Reaktionszeiten (mittlere, minimale, und maximale Reaktionszeit), sowie eine niedrigere Anzahl versäumter Er-

eignisse als unter Teilnahmebedingung“ (Thomas et al. 2015). Eine höhere Vigilanz geht also mit weniger Total-Power im EEG einher.

Möglicherweise ließen die Probanden unter Teilnahmebedingung eine niedrigere Vigilanz und eine größere Müdigkeit zu. Dies würde die höhere Alpha-Theta- und Delta-Aktivität erklären. Da die Probanden während des 90-minütigen Tests aber nicht schlafen durften, mussten sie immer wieder sehr stark gegen die Müdigkeit ankämpfen. Dies könnte die hohe Beta- und Gamma- Aktivität erklären. Schiefen die Probanden während der Testung tatsächlich ein, kam es zu einem auditorischen Stimulus, der in der Regel zu einem Arousal bei den Probanden führte. Waren die Probanden trotzdem nicht erweckbar, wurde dies über einen Monitor durch einen der Versuchsleiter bemerkt, und der Proband wurde wieder erweckt. Es ist durchaus denkbar, dass die Probanden hierauf mit einer kurzfristigen Steigerung der zentralnervösen Erregung reagierten und diese letztlich als gesteigerte Beta- und Gamma-Aktivität gemessen wurde.

In anderen Studien konnten im Gegensatz hierzu häufig keine Auswirkung von höherer Motivation auf die Leistung bei Vigilanztests festgestellt werden.

Boksem et al. untersuchten 25 weibliche Probanden. Während eines 20 minütigen Buchstabenunterscheidungstest wurden „event related potentials“ registriert. Die Motivation der Probanden wurde mittels verschiedener Fragebögen ermittelt. Es zeigte sich keine bessere Leistung bei den subjektiv motivierteren Probanden (Boksem et al. 2006). Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, dass hierbei keine monetäre Belohnung erfolgte, sondern von der natürlichen Motivation der Probanden ausgegangen wurde. Es liegt nah, dass Unterschiede der Motivationsgrade hierbei wesentlich schwerer abzubilden sind.

Auch Lorist et al. untersuchten den Einfluss von geistiger Erschöpfung (mental fatigue) und Motivation auf neuronale Prozesse in Form von EEG-Korrelaten. 26 gesunde Probanden wurden durch einen 2 stündigen Vigilanztest ermüdet. Hiernach wurden sie durch einen Wettbewerb untereinander und einen monetären Anreiz für erneut 20 Minuten Performance während des gleichen Vigilanztest motiviert. Hierbei konnte kein Zusammenhang zwischen dem monetären Anreiz und der Performance bei dem Vigilanztest festgestellt werden (Lorist et al. 2009). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen sich demnach widersprüchlich zu unseren Ergebnissen.

Lorist und Bakem et al. untersuchten ihre Probanden nicht unter Schlafentzug. Beide ermüdeten die Probanden vorher durch lange Testungszeiten. Unsere Probanden waren sicherlich durch den Schlafentzug während der Nachtschicht physisch und aufgrund der Tätigkeit auch geistig erschöpft. Hieraus ergibt sich also eine unterschiedliche Ausgangssituation. Ein Vergleich mit der vorliegenden Studie fällt deshalb schwer.

### *Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während des PSTs unter Belohnungs- und Teilnahmebedingung*

Während des PSTs konnte unter Belohnungsbedingung eine höhere okzipitale Alpha- und eine höhere frontale Gamma-Aktivität als unter Teilnahmebedingung gemessen werden. Die Power-Werte der Total-Power, Beta-, Delta- und Theta-Aktivitäten unterschieden sich nicht signifikant. Da der PST im Gegensatz zum VigiMar nur 11 Minuten dauert, und zudem während der gesamten Testdauer ein Versuchsleiter anwesend ist, dürften hierbei die Probanden sowohl unter Teilnahme- als auch unter Belohnungsbedingung dem Schlafbedürfnis eher widerstehen können als beim langen, monotonen VigiMar. Auch die aufrechte Sitzposition und das Abstützen auf der eher unbequemen Kinnstütze stellt eine wesentlich ungemütlichere Situation als beim VigiMar dar, bei dem die Probanden halb liegenden mit einer wärmenden Decke in einem bequemen Sessel ruhen dürfen. Es ist also durchaus denkbar, dass während des PSTs insgesamt schnellere Frequenzen vorherrschten. Unter Belohnungsbedingung wurden diese in Form von einer höheren Gamma-Aktivität gesteigert.

Diese Ergebnisse sind kongruent zu den Ergebnissen von Gergelyfi et al..

Diese untersuchten 2015 18 gesunde Probanden bezüglich des Zusammenhangs zwischen geistiger Erschöpfung (mental fatigue) und monetärer Belohnung. Die Probanden mussten hierbei 120 Minuten Sudokus lösen, um einen Zustand geistiger Erschöpfung hervorzurufen. Dieser wurde dann mittels Arbeitsgedächtnistest überprüft. Hierbei konnten die Teilnehmer je nach Ergebnis unterschiedlich viel Geld verdienen. Der Effekt der monetären Belohnung wurde zudem durch einen einfachen Reaktionszeittest nochmals überprüft. Es zeigten sich weniger EEG-Korrelate der Motivation als erwartet. Lediglich eine steigen-



de Gamma-Power konnte mit einer höheren Motivation in Zusammenhang gebracht werden. Allerdings konnte kein Zusammenhang zwischen den verschiedenen Motivationsleveln und besseren oder schlechteren Testergebnissen erhoben werden. Höhere monetäre Anreize hatten keine bessere Testleistungen zu Folge und konnten die mentale Erschöpfung nicht reduzieren (Gergelyfi et al. 2015). Bei der Testanalyse durch Thomas et al. konnte in unserer Studie kein statistisch bedeutsamer Zusammenhang zwischen den Testergebnissen des PSTs unter Belohnungs- oder Teilnahmebedingung erhoben werden (Thomas 2015). Bei der Betrachtung der Absolutwerte zeigte sich jedoch tendenziell ein Zusammenhang zwischen der Belohnungsbedingung und höherer Vigilanz bei dem PST.

Im Gegensatz zu Gergelyfi et al., bei denen sich zwar insgesamt eine höhere Gamma-Aktivität bei gesteigerter Motivation, aber keine Unterschiede bei den Testergebnissen bezüglich des PSTs zeigten, lässt sich laut unserer Ergebnisse ein Zusammenhang zwischen Motivation und Vigilanz während des PSTs nicht von der Hand weisen.

Der Zusammenhang zwischen monetärer Belohnung bei Vigilanztest und ihren hirnelektrischen Korrelaten wurde in 2015 auch von Hosseini et al. untersucht. Hierbei erfolgte die Belohnung während eines virtuellen Computerspiels. Ein belohnender Feedback Stimulus während des Spiels führte zu hoher Beta-Aktivität im EEG (Hosseini und Holroyd 2015). Dies konnte auch in vielen anderen Studien gezeigt werden (Cohen et al. 2007), (Marco-Pallares et al. 2008), (Alicart et al. 2015). Hierbei handelt es sich allerdings um motivierende Stimuli während des Tests. Dies macht die Vergleichbarkeit mit unseren Testbedingungen schwierig. Unsere Probanden wussten schon vor Beginn der Tests, ob sie unter Belohnungsbedingung oder Teilnahmebedingung getestet werden.

Die Darstellung hirnelektrischer Korrelate von Motivation führt in der Literatur zu unterschiedlichsten Ergebnissen. Es ist wichtig, beim Vergleich mit anderen Studien auch die Testbedingungen mitzubedenken. Der Einfluss der Motivation auf Vigilanztestergebnisse wurde bei den beschriebenen Studien nicht unter Schlafentzug untersucht. Hieraus ergibt sich eine wesentlich veränderte Testbedingung. Unter Schlafentzug ergeben sich höchst-wahrscheinlich sehr veränderte hirnelektrische Aktivitäten. Auch die Art und Dauer der verschiedenen Vigilanztests macht den Vergleich sehr schwierig. Durch unsere Studie

konnte eine erste Einschätzung der Zusammenhänge zwischen monetärer Belohnung und den Testergebnissen sowie hirnelektrischen Korrelaten beim VigiMar und PST vorgegeben werden. Mittels einer größeren Stichprobenzahl könnte man eine noch größere statistische Genauigkeit erzielen. Da der Vergleich mit anderen Studien schwerfällt, würde es durchaus Sinn machen unsere Studie mit einer größeren Probandenanzahl zu wiederholen, um zu einer höheren Aussagekraft zu gelangen und unsere Ergebnisse zu überprüfen.

## 5. Fazit

### **Hirnelektrische Korrelate während der Vigilanztests:**

- Eine hohe Alpha und Theta-Aktivität während des VigiMars sprechen für schlechtere Testergebnisse, also einer niedrigeren Vigilanz.
- Eine hohe Total-Power, Delta-, Beta-, und Gamma-Aktivität während des VigiMars gehen mit besseren Testergebnissen, also höherer Vigilanz einher.
- Der Zusammenhang zwischen hoher Beta- und Gamma-Aktivität und einer höheren Vigilanz zeigt sich stärker unter Belohnungsbedingung als unter Teilnahmebedingung.
- Eine hohe Total Power, sowie eine hohe okzipitale Beta- und Gamma-Aktivität während des PSTs, gehen mit besseren Testergebnissen, also höherer Vigilanz einher.

### **Zusammenhang zwischen der nächtlichen elektrischen Hirnaktivität (in der Nacht vor der Vigilanztestung) und den Testleistungen am nächsten Morgen:**

- Unter Belohnungsbedingung geht eine hohe Beta-Aktivität in der Nacht mit schlechteren Testergebnissen, bzw. einer niedrigeren Vigilanz beim VigiMar am nächsten Morgen einher.
- Eine hohe Delta-Aktivität in der Nacht geht mit besseren Testergebnissen bzw. einer höheren Vigilanz beim VigiMar am nächsten Morgen einher.
- Die Absolutwerte der Korrelation zwischen hoher Theta-Aktivität in der Nacht und besseren Testergebnissen bzw. einer höheren Vigilanz beim VigiMar weisen in dieselbe Richtung, sind allerdings nicht signifikant.
- Unter Belohnungsbedingung geht eine erhöhte nächtliche Beta- und Gamma-Aktivität mit schlechteren Testergebnissen bzw. einer niedrigeren Vigilanz beim PST einher.

- Eine hohe nächtliche Delta- und Theta-Aktivität gehen unter Belohnungsbedingung mit besseren Testergebnissen bzw. einer höheren Vigilanz einher

### **Nächtliche hirnelektrische Aktivität und morgendliche hirn-elektrische Aktivität während des VigiMars und des PSTs:**

- Die Total-Power der Nacht korreliert signifikant mit der Total-Power während der Vigilanztests
- Die Alpha-Aktivität der Nacht korreliert signifikant mit der Alpha-Aktivität während der Vigilanztests
- Die Beta-Aktivität der Nacht korreliert signifikant mit der Beta-Aktivität während der Vigilanztests
- Die Gamma-Aktivität der Nacht korreliert signifikant mit der Gamma-Aktivität während der Vigilanztests
- Die Theta-Aktivität der Nacht korreliert signifikant mit der Theta-Aktivität während der Vigilanztests
- Die Delta-Aktivität der Nacht korreliert signifikant mit der Delta-Aktivität während der Vigilanztests
- Insgesamt ähneln sich die Powerspektren der Nacht mit den Powerspektren während der Vigilanztests

### **Unterschiede der hirnelektrischen Aktivität während der Tests unter Belohnungs- und Teilnahmebedingungen**

- Während des VigiMars zeigt sich unter Teilnahmebedingung eine höhere Total-Power, Alpha-, Beta-, Gama-, Theta- und Delta-Aktivität als unter Belohnungsbedingung
- Während des PSTs zeigte sich unter Belohnungsbedingung eine höhere Alpha- und Gamma-Aktivität als unter Teilnahmebedingung.
- Die Power-Werte der Total-Power, Beta-, Delta- und Theta-Aktivitäten unterschieden sich während des PSTs nicht signifikant.

Insgesamt zeigen sich vor allem für die hirnelektrischen Korrelate der Vigilanz beim VigiMar und PST Ergebnisse, die kongruent zur aktuellen Literatur sind. Mit dieser Arbeit konnte vor allem der VigiMar, der bereits in 1986 entwickelt wurde, weiter validiert werden. Der Analyse der Total-Power als hirnelektrisches Korrelat von Vigilanz sollte laut unserer Ergebnisse bei weiteren Studien mehr Bedeutung beigemessen werden.

Der Zusammenhang zwischen nächtlicher hirnelektrischer Aktivität und Vigilanztestergebnissen am nächsten Morgen sowie der Zusammenhang zwischen hirnelektrischer Aktivität in der Nacht und während Vigilanztests am nächsten Morgen sind neuartig und können als Grundlage für die weitere Erforschung dieser hirnelektrischen Zusammenhänge dienen.

Besonders die Ergebnisse zu den ähnlichen Powerspektren der Nacht und am nächsten Morgen während der Vigilanztests lassen die Frage aufkommen, ob es Sinn machen könnte, bei weiteren Untersuchungen eine Art individuelles Baseline-EEG aufzuzeichnen. Ausgehend von diesem Baseline-EEG könnten Veränderungen der hirnelektrischen Aktivität besser erkannt werden.

Bezüglich der hirnelektrischen Korrelate der verschiedenen Motivationsgrade, bleiben einige Fragen offen. Beispielsweise wäre es interessant zu klären, warum ausgerechnet unter Teilnahmebedingung eine höhere Total-Power und eine höhere Aktivität aller anderer Banden während des VigiMars gemessen wurde. Auch im klinischen Alltag könnte es helfen den Motivationsgrad des Patienten hirnelektrisch zu überprüfen um zu einer größeren Objektivierbarkeit der Vigilanztestergebnisse zu gelangen. Dass der Motivationsgrad Auswirkung auf Vigilanztestergebnisse hat, konnte durch Thomas et al. (2015) gezeigt werden. Inwiefern dieser durch hirnelektrische Korrelate objektiviert werden kann, muss geprüft werden.

## 6. Zusammenfassung

### Einleitung und Methode

Tagesschläfrigkeit und Vigilanzminderung werden im Schlafmedizinischen Zentrum der Philipps-Universität Marburg mit Hilfe des in Marburg entwickelten Vierfachwahl-Reaktionszeit-Test VigiMar und des pupillo-graphischen Schläfrigkeitstests PST objektiviert. Wir untersuchten beide Vigilanztests auf hirnelektrische Korrelate von Vigilanzminderung und Schläfrigkeit mit Hilfe von EEG-Messungen. Des Weiteren wurde untersucht, inwiefern sich unterschiedlich hohe Motivation in den EEG-Aufzeichnungen widerspiegelt. Zudem wurden hirnelektrische Aktivität in der Nacht und Testleistungen am nächsten Tag in Bezug gesetzt.

In dem Zeitraum von Oktober 2012 bis September 2013 führten wir bei 20 gesunden studentischen Mitarbeitern des Schlafmedizinischen Zentrums nach Arbeitsnächten mit moderatem Schlafentzug (mittlere Schlafdauer 2,25 Stunden) während der Durchführung des VigiMar und des PSTs EEG-Aufzeichnungen durch. Jeder Proband wurde zweimal getestet: einmal unter der Testbedingung „Belohnung“, einmal unter der Testbedingung „Teilnahme“. Belohnung bedeutete, dass je nach Wachheit in den Tests bis zu 400 € ausgezahlt wurden. Unter der Testbedingung „Teilnahme“ erfolgte lediglich eine pauschale Vergütung von € 25 unabhängig von den Testergebnissen.

Aus den EEG-Aufzeichnungen wurde die relative und absolute Power innerhalb der Frequenzbänder Delta (0,5 – 4,0 Hz), Theta (4,0 – 8,0 Hz), Alpha (8,0 – 13 Hz), Beta (13 – 30 Hz) und Gamma (30 – 70 Hz) berechnet. Außerdem wurde die Total Power der einzelnen Bänder bestimmt.

### Ergebnisse

Hohe Alpha und Theta-Aktivität während des VigiMars gingen mit langsameren Reaktionszeiten, also niedrigerer Vigilanz einher. Hohe Total-Power, Delta-, Beta-, und Gamma-Aktivität gingen dagegen mit kürzeren Reaktionszeiten, also höherer Vigilanz einher. Der Zusammenhang zwischen hoher Beta- und Gamma-Aktivität und Vigilanz zeigte sich stärker unter Belohnungsbedingung als unter Teilnahmebedingung.

Im PST zeigten sich nicht so klare Zusammenhänge, aber eine hohe Total Power sowie eine hohe okzipitale Beta- und Gamma-Aktivität korrespondierten auch in diesem Test mit einem geringeren Pupillenunruheindex (PUI), also höherer Vigilanz.

Auf hohe Beta-Aktivität in der Nacht folgten am nächsten Morgen längere Reaktionszeiten im VigiMar. Hohe nächtliche Delta-Aktivität korrespondierte mit besseren Testleistungen.

Für den PST zeigten sich ähnliche Zusammenhänge nur unter Belohnungsbedingungen: Erhöhte nächtliche Beta- und Gamma-Aktivität gingen mit höherem PUI, also niedrigerer Vigilanz einher. Auf hohe nächtliche Delta- und Theta-Aktivität folgte ein niedrigerer PUI, also eine höhere Vigilanz.

### **Diskussion**

Für die hirnelektrische Aktivität während des VigiMars zeigten sich plausible, mit der Literatur für ähnliche Testverfahren übereinstimmende Ergebnisse. Mit Wachheit assoziierte Frequenzbänder (Beta und Gamma) korrespondierten mit guten Testergebnissen, Alpha (entspannte Wachheit) und Theta-Aktivität (Übergang Richtung Schlaf) weisen auf schlechte Testergebnisse hin. Die für den PUI in dieser Studie erstmals aufgezeigten ähnlichen Zusammenhänge mit dem Beta- und Gamma-Band weisen in eine ähnliche Richtung, sind aber nicht ganz so robust. Auch die nach unserem Wissen erstmals in dieser Studie erfassten Zusammenhänge zwischen EEG-Frequenzbändern in nächtlichen Kurzschlafphasen und Vigilanztestergebnissen am nächsten Morgen sind augenscheinlich. Hohe nächtliche Beta-Aktivität, die für Wachheit spricht, wird von schlechteren Testergebnissen gefolgt. Bessere Testergebnisse gehen mit höherer tiefschlafassoziierte Delta-Aktivität einher. Für den PST zeigen sich wiederum ähnliche Ergebnisse, die allerdings nur unter Belohnungsbedingungen statistische Bedeutsamkeit erreichen.

Die weniger deutlichen Ergebnisse des PST können der kürzeren Testzeit (11 vs. 90 Minuten, damit kleinere Datenbasis der Powerspektren) geschuldet sein oder dafür sprechen, dass Ergebnisse des VigiMar besser mit EEG-Indikatoren der Wachheit zusammenhängen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können als „Proof of Concept“ für den VigiMar und eingeschränkt für den PST bewertet werden, da hirnelektrische Aktivität während der Tests mit der in der vorherge-

henden Kurzschlafphase und mit den Testergebnissen in physiologisch zu erwartender Weise zusammenhängen.



## 7. Summary

### **Introduction and method:**

In the Center of Sleep-Medicine at Philipps-Universität Marburg daytime drowsiness and reduction of vigilance are currently under examination by using both a Marburg developed quadruple-choice reaction time test called *VigiMar* and by a pupillographic PST drowsiness test. Both of these vigilance-tests were carried out on brain electrical correlates of reduction of vigilance and sleepiness with the help of EEG-tests. Furthermore we tested how differently, high-motivation was shown in the EEG-test results. Brain electrical activity during the night, and test results obtained the following day, were also taken into consideration.

From October 2012 to September 2013 we tested 20 student assistants from the Center of Sleep medicine after having worked nights and with moderate sleep deprivation (average sleep 2.25 hours), while carrying out *VigiMar* and PST and making EEG recordings. Every proband was examined twice: Once under the test condition “Reward” and once under the test condition “Participation”. Test condition “Reward” meant that the experimentee could receive a payment up to 400 Euros according to how awake they were. Under test condition “Participation” there was only a flat sum of 25 Euros offered, irrespective of the results of the tests.

The relative and absolute power in the frequency bands Delta (0.5-4.0 Hz), Theta (4.0-8.2 Hz), Alpha (8.0-13 Hz), Beta (13-30 Hz) and Gamma (30-70 Hz) was calculated from the EEG recordings. In addition, the total power from each band was determined.

### **Results:**

High Alpha and Theta activity during the *VigiMar* correlated with slower reaction times, meaning lower vigilance. High total power, Delta, Beta and Gamma activity on the other hand was accompanied by shorter reaction times and consequently higher vigilance. The correlation between high Beta and Gamma-activity and vigilance was more distinct under conditions of reward than under conditions of participation.

In the PST the correlation was not as clearly marked but a high total power, as well as high occipital Beta and Gamma activity, also corresponded in the test with a smaller pupillary unrest index (PUI), therefore higher vigilance.

The next morning longer reaction times in the VigiMar followed on from high Beta activity during the night. High Delta activity at night corresponded to better results in the tests.

For the PST, similar correlations were only observed under conditions of reward: Increased nightly Beta and Gamma activity correlated with higher PUI, meaning lower vigilance. On high Delta and Theta activity a lower PUI could be seen, as well as a higher vigilance.

### **Discussion:**

Plausible results for brain electrical activity during VigiMars could be shown to agree with the literature using similar test methods. The frequency bands associated to being awake (Beta and Gamma) corresponded to good test results. Alpha (relaxed state of being awake) and Theta activity (transition toward sleep) showed bad test results. A similar correlation with the Beta and Gamma band shown for the PUI for the first time in this study led in a similar direction, without being too robust. The correlation between EEG frequency bands during nightly phases of short sleep and the results of the vigilance test the next morning are, on the face of it, valid and, as far as we can judge, the first ever recordings of it. Worse test results following high nightly Beta activity suggests wakefulness. Better Test results match higher Delta activity being associated with deep-sleep. Similar results can be shown for the PST, which, however, only reached statistical significance under the conditions of reward.

The results of the PST being less clear may be due to a shorter testing time (11 versus 90 minutes, with an appropriately smaller data base of the power spectra) or indicate that VigiMar results correlate better with the EEG indicators of wakefulness. The results of this research study can be evaluated as a “Proof of Concept” for the VigiMar and to a lesser degree for the PST, because brain electrical activity during the tests correlated with the results of the forgoing short sleep phase in a physiologically expected manner.

## 8. Anhang

### 8.1. Literaturverzeichnis

Das AASM-Manual zum Scoring von Schlaf und assoziierten Ereignissen. Regeln, Technologie und technische Spezifikationen (2007). 1. Aufl. Heidelberg, Neckar: Steinkopff.

A, Craig; al, et: Regional brain wave activity changes associated with fatigue. - PubMed - NCBI. Online verfügbar unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Regional+brain+wave+activity+changes+associated+with+fatigue>, zuletzt geprüft am 11.09.2015.

Akerstedt, T.; Gillberg, M. (1990): Subjective and objective sleepiness in the active individual. In: *Int. J. Neurosci.* 52 (1-2), S. 29–37.

Alicart, H.; Cucurell, D.; Mas-Herrero, E.; Marco-Pallares, J. (2015): Human oscillatory activity in near-miss events. In: *Social Cognitive and Affective Neuroscience*.

AMTech Pupilknowlogy GmbH: Neuer Parameter hilft zur Meßzeitverkürzung. Online verfügbar unter <http://www.amtech.de/de/neues/neuer-parameter-hilft-zur-messzeitverkuerzung>.

Belyavin, A.; Wright, N. A. (1987): Changes in electrical activity of the brain with vigilance. In: *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 66 (2), S. 137–144.

Boksem, Maarten A.S; Tops, Mattie; Wester, Anne E.; Meijman, Theo F.; Lorist, Monique M. (2006): Error-related ERP components and individual differences in punishment and reward sensitivity. In: *Brain Research* 1101 (1), S. 92–101.

Cajochen, C.; Khalsa, S. B.; Wyatt, J. K.; Czeisler, C. A.; Dijk, D. J. (1999): EEG and ocular correlates of circadian melatonin phase and human performance decrements during sleep loss. In: *Am. J. Physiol.* 277 (3 Pt 2), S. R640-9.

Caldwell, John A.; Prazinko, Brian; Caldwell, J. Lynn (2003): Body posture affects electroencephalographic activity and psychomotor vigilance task performance in sleep-deprived subjects. In: *Clin Neurophysiol* 114 (1), S. 23–31.

Canisius, Sebastian; Penzel, Thomas (2007): Vigilance monitoring--review and

practical aspects. In: *Biomed Tech (Berl)* 52 (1), S. 77–82.

Cassel, Ploch Kesper: Marburger Vigilanztest - VigiMar. In: *DSGM Kompendium Schlafmedizin*, 17. Erg. Lfg. 5/11; Kapitel 3.2.6.2, S. 1–6, zuletzt geprüft am 2011.

Cassel, W.; Ploch, T.; Kesper, K.; Speicher, T.; Conradt, R.; Faust, M. et al. (2011): Vigilance in patients with obstructive sleep apnea and surgical patients. In: *Somnologie* 15 (2), S. 97–104.

Chua, E. C.-P; Yeo, S.-C; Lee, I. T.-G; Tan, L.-C; Lau, P.; Tan, S. S. et al. (2014a): Individual differences in physiologic measures are stable across repeated exposures to total sleep deprivation. In: *Physiological Reports* 2 (9), S. e12129.

Chua, Eric Chern-Pin; Yeo, Sing-Chen; Lee, Ivan Tian-Guang; Tan, Luuan-Chin; Lau, Pauline; Cai, Shiwei et al. (2014b): Sustained Attention Performance during Sleep Deprivation Associates with Instability in Behavior and Physiologic Measures at Baseline. In: *SLEEP*.

Cohen, Michael X.; Elger, Christian E.; Ranganath, Charan (2007): Reward expectation modulates feedback-related negativity and EEG spectra. In: *NeuroImage* 35 (2), S. 968–978.

Corsi-Cabrera, M.; Arce, C.; Ramos, J.; Lorenzo, I.; Guevara, M. A. (1996): Time course of reaction time and EEG while performing a vigilance task during total sleep deprivation. In: *Sleep* 19 (7), S. 563–569.

Craig, Ashley; Tran, Yvonne; Wijesuriya, Nirupama; Nguyen, Hung (2012): Regional brain wave activity changes associated with fatigue. In: *Psychophysiology* 49 (4), S. 574–582.

Gergelyfi, Mónika; Jacob, Benvenuto; Olivier, Etienne; Zénon, Alexandre (2015): Dissociation between mental fatigue and motivational state during prolonged mental activity. In: *Front. Behav. Neurosci.* 9.

Gevins, A. S.; Zeitlin, G. M.; Ancoli, S.; Yeager, C. L. (1977): Computer rejection of EEG artifact. II. Contamination by drowsiness. In: *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 43 (1), S. 31–42.

Head, Henry (1923): The conception of nervous and mental energy (II). In: *British Journal of Psychology. General Section* 14 (2), S. 126–147.

- Hoedlmoser, Kerstin; Griessenberger, Hermann; Fellingner Robert; Freunberger, Roma; Klimesch, Wolfgang; Gruber, Walter; Schabus, Manuel (2011): Event-related activity and phase locking during a psychomotor vigilance task over the course of sleep deprivation. In: *Journal of Sleep Research* 20 (3), S. 377–385.
- Hosseini, Azadeh Haji; Holroyd, Clay B. (2015): Reward feedback stimuli elicit high-beta EEG oscillations in human dorsolateral prefrontal cortex. In: *Sci. Rep.* 5, S. 13021.
- James, William (1950): *The principles of psychology*. 1890. Aufl. New York, NY: Dover-Publ (Dover-books on biology, psychology and medicine).
- Johnson, Robin R.; Popovic, Djordje P.; Olmstead, Richard E.; Stikic, Maja; Levendowski, Daniel J.; Berka, Chris (2011): Drowsiness/alertness algorithm development and validation using synchronized EEG and cognitive performance to individualize a generalized model. In: *Biol Psychol* 87 (2), S. 241–250.
- Jung, T. P.; Makeig, S.; Stensmo, M.; Sejnowski, T. J. (1997): Estimating alertness from the EEG power spectrum. In: *IEEE Trans Biomed Eng* 44 (1), S. 60–69.
- Kaida, Kosuke; Akerstedt, Torbjörn; Kecklund, Göran; Nilsson, Jens P.; Axelsson, John (2007): Use of subjective and physiological indicators of sleepiness to predict performance during a vigilance task. In: *Ind Health* 45 (4), S. 520–526.
- Kalauzi, Aleksandar; Vuckovic, Aleksandra; Bojić, Tijana (2012): EEG alpha phase shifts during transition from wakefulness to drowsiness. In: *Int J Psychophysiol* 86 (3), S. 195–205.
- Kamzanova, A. T.; Kustubayeva, A. M.; Matthews, G. (2014): Use of EEG Workload Indices for Diagnostic Monitoring of Vigilance Decrement. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 56 (6), S. 1136–1149.
- Kursawe, Hubertus; Kubicki, Stanislaw (2012): Vigilanz und Schlaf. In: Stephan Zschocke und Hans-Christian Hansen (Hg.): *Klinische Elektroenzephalographie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 113–136.

- Lorenzo, I.; Ramos, J.; Arce, C.; Guevara, M. A.; Corsi-Cabrera, M. (1995): Effect of total sleep deprivation on reaction time and waking EEG activity in man. In: *Sleep* 18 (5), S. 346–354.
- Lorist, Monique M.; Bezdan, Eniko; Caat, Michael ten; Span, Mark M.; Roerdink, Jos B.T.M; Maurits, Natasha M. (2009): The influence of mental fatigue and motivation on neural network dynamics; an EEG coherence study. In: *Brain Research* 1270, S. 95–106.
- Lüdtke, H.; Wilhelm, B.; Adler, M.; Schaeffel, F.; Wilhelm, H. (1998): Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves. In: *Vision Res.* 38 (19), S. 2889–2896.
- Mackworth, N. H. (1948): The breakdown of vigilance during prolonged visual search. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 1 (1), S. 6–21.
- Makeig, S.; Jung, T. P. (1996): Tonic, phasic, and transient EEG correlates of auditory awareness in drowsiness. In: *Brain Res Cogn Brain Res* 4 (1), S. 15–25.
- Marco-Pallares, Josep; Cucurell, David; Cunillera, Toni; García, Rafael; Andrés-Pueyo, Antonio; Münte, Thomas F.; Rodríguez-Fornells, Antoni (2008): Human oscillatory activity associated to reward processing in a gambling task. In: *Neuropsychologia* 46 (1), S. 241–248.
- Mathis, J.; Hess, C. W. (2009): Sleepiness and vigilance tests. In: *Swiss Med Wkly* 139 (15-16), S. 214–219.
- Matousek, M.; Petersén, I. (1983): A method for assessing alertness fluctuations from EEG spectra. In: *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 55 (1), S. 108–113.
- Merritt, Sharon L.; Schnyders, Harold C.; Patel, Minu; Basner, Robert C.; O'Neill, William (2004): Pupil staging and EEG measurement of sleepiness. In: *International Journal of Psychophysiology* 52 (1), S. 97–112.
- Neu, D.; Mairesse, O.; Newell, J.; Verbanck, P.; Peigneux, P.; Deliens, G. (2015): Does more sleep matter? Differential effects of NREM- and REM-dominant sleep on sleepiness and vigilance. In: *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology* 45 (2), S. 167–175.
- O'Hanlon, James F.; Beatty, Jackson (1977): Concurrence of Electroencephalographic and Performance Changes During a Simulated Radar Watch and Some

- Implications for the Arousal Theory of Vigilance. In: Robert R. Mackie (Hg.): Vigilance. Boston, MA: Springer US, S. 189–201.
- Oken, B. S.; Salinsky, M. C.; Elsas, S. M. (2006): Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. In: *Clin Neurophysiol* 117 (9), S. 1885–1901.
- Otmani, Sarah; Pebayle, Thierry; Roge, Joceline; Muzet, Alain (2005): Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers. In: *Physiol. Behav.* 84 (5), S. 715–724.
- Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968). A Manual Of Standardized Terminology, Techniques And Scoring System For Sleep Stages Of Human Subjects.
- Regen, Francesca; Dorn, Hans; Danker-Hopfe, Heidi (2013): Association between pupillary unrest index and waking electroencephalogram activity in sleep-deprived healthy adults. In: *Sleep Med.* 14 (9), S. 902–912.
- Rodenbeck, A. (2013): Manual der American Academy of Sleep Medicine. In: *Somnologie* 17 (2), S. 122–130.
- Smith, Michael E.; McEvoy, Linda K.; Gevins, Alan (2002): The impact of moderate sleep loss on neurophysiologic signals during working-memory task performance. In: *Sleep* 25 (7), S. 784–794.
- Strijkstra, Arjen M.; Beersma, Domien G. M.; Drayer, Berdine; Halbesma, Nynke; Daan, Serge (2003): Subjective sleepiness correlates negatively with global alpha (8-12 Hz) and positively with central frontal theta (4-8 Hz) frequencies in the human resting awake electroencephalogram. In: *Neurosci. Lett.* 340 (1), S. 17–20.
- Thomas, L.; (2016): Motivationale Einflüsse auf die Ergebnisse von Aufmerksamkeitsuntersuchungen
- Torsvall, L.; Akerstedt, T. (1987): Sleepiness on the job: continuously measured EEG changes in train drivers. In: *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 66 (6), S. 502–511.
- Trepel, Martin (2012): Neuroanatomie. Struktur und Funktion : [mit dem Plus

im Web - Zugangscode im Buch]. 5. Aufl. München: Urban & Fischer in Elsevier.

Weeß, H.-G; Sauter 2, C.; Geisler 3, P.; Bohning 4, W.; Wilhelm 5, B.; Rotte 6, M. et al. (2000): Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schlaftrigkeit Diagnostische Instrumentarien zur Messung müdigkeits- und schlaftrigkeitsbezogener Prozesse und deren Gutekriterien. Vigilance, Tendency to Fall Asleep, Sustained Attention, Tiredness, Sleepiness Diagnostic Tools for the Measurement of Sleepiness Related Processes and their Criteria of Quality. In: *Somnologie* 4 (1), S. 20–38.

Weeß, H.-G; Lund, R.; Gresele, C.; Böhning, W.; Sauter, C.; Steinberg, R. (1998): Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schlaftrigkeit. In: *Somnologie* 2 (1), S. 32–41.

Wilhelm, Barbara (2006): Über die Spontanoszillationen der Pupille und ihre Beziehung zum zentralnervösen Aktivierungsniveau. 1. Aufl. Stuttgart, Berlin: Steinbeis-Ed.

Wilhelm, Barbara; Korner, Andreas; Heldmaier, Katrin; Moll, Kerstin; Wilhelm, Helmut; Ludtke, Holger (2001): Normwerte des pupillographischen Schlaftrigkeitstests für Frauen und Männer zwischen 20 und 60 Jahren. Normal Values of the Pupillographic Sleepiness Test in Male and Female Subjects Aged 20 to 60 Years. In: *Somnologie* 5 (3), S. 115–120.

Zschocke, Stephan; Hansen, Hans-Christian (Hg.) (2012): Klinische Elektroenzephalographie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.



### **8.3. Verzeichnis der akademischen Lehrer**

Meine akademischen Lehrer in Marburg waren die Damen und Herren Professoren und Privatdozenten:

Bartsch, Baum, Baumann, Becker, Brehm, Czubayko, Cetin, Daut, Del Rey, Griss, Grzeschik, Gudermann, Jungclas, Kill, Kinscherf, Krause, Krieg, Kroll, Maier, Moll, Müller, Mutters, Neubauer, Oliver, Ortel, Radsak, Remschmidt, Renz, Richter, Schäfer, Schütz, Seitz, S. Schmidt, CM. Schmidt, Schrader, Steinger, Vedder, Weiler, Werner, Westermann, Wilhelm, Wrocklage, Wulf

## 8.4. Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlichst bedanken. Zunächst gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Ulrich Koehler, Leiter des Schlafmedizinischen Zentrum der Philipps-Universität Marburg für die freundliche Unterstützung bei meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Ganz besonders danke ich Herrn Dipl. Psychologen Werner Cassel, der mir durch seinen Ideenreichtum sowie der immensen Erfahrung im wissenschaftlichen Denken während jeder Phase meiner Arbeit intensiv, professionell und helfend zur Seite stand. Ich bedanke mich für die Überlassung dieses spannenden Themas und für die Bereitstellung meines Arbeitsplatzes während der Durchführung der Studie.

Ich danke Luisa Thomas und Christoph Lichtenberger für die kooperative und freundschaftliche Zusammenarbeit in unserer Projektgruppe.

Überaus dankbar bin ich für die so große Hilfe von Herr Dr. rer. nat. Karl Kesper, der uns durch seine EDV Kenntnisse erst die wissenschaftliche Auswertung unserer Daten ermöglichte. Auch bei jeglichen anderen technischen Problemen wusste er uns stets zu helfen und zeigte sich hierbei geduldig und warmherzig.

Ich danke Frau Petra Mayer, leitende MTA des Schaflabors sowie den MTAs Frau Christa Nau und Frau Astrid Schäfer, die uns durch ihre langjährige Erfahrung bei der Auswertung von so vielen Polysomnogrammen unterstützen.

Ich danke Frau Dr. Angelika Horn, die durch ihre mehrfache kritische Durchsicht und Betrachtung dieser Abhandlung zu vielen wertvollen Diskussionen anregte. In besonderem Maße spendete ihre Unterstützung mir viel Mut und Kraft zur Vollendung der Arbeit.

Ich danke Katarina Heye und Leslie Udvarhelyi für gewissenhafte Korrekturen.

Ich danke unserer wundervollen Sommerweg-Hausgemeinschaft in Kassel, die während der Verfassung meiner Arbeit eine so freundlich familiäre Lebensatmosphäre erschuf.

Ich danke meiner lieben Familie für so vieles, was sich nicht in Worte fassen lässt.