

Aus der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie des
Zentrums für Integrative Psychiatrie gGmbH
(Direktor: Prof. Dr. med. J. B. Aldenhoff)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**KURZ- UND LANGZEITUNTERSUCHUNG ÜBER DEN EINFLUSS
ELEKTROMAGNETISCHER HOCHFREQUENZFELDER AUF DAS
FREQUENZSPEKTRUM DES MENSCHLICHEN
SCHLAFELEKTROENZEPHALOGRAMMS: EINE FOLGESTUDIE**

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

KATHRIN MAAB

aus Bielefeld

Kiel 2009

1. Berichtstatter: _____

2. Berichtstatter: _____

Tag der mündlichen Prüfung: _____

Zum Druck genehmigt, Kiel, den _____

gez. _____

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	5
2.1 Elektrophysiologie des Gehirns	5
2.2 Schlafphysiologie	5
2.2.1 Stadium wach	6
2.2.2 Stadium I	6
2.2.3 Stadium II	7
2.2.4 Stadium III	7
2.2.5 Stadium IV	7
2.2.6 Stadium REM	7
2.3 Leistungsspektren	9
2.4 Leistungsspektren und Frequenzbänder	13
3. Methodik	14
3.1 Probandenkollektiv	14
3.1.1 Probandengruppen	15
3.2 Versuchsaufbau	16
3.3 Erzeugung des elektromagnetischen Feldes	18
3.4 Versuchsablauf	19
3.5 Ableitschema	19
3.6 Aufzeichnung der polysomnographischen Daten	21
3.7 Auswertung	22
3.7.1 Schlafstadienauswertung	22
3.7.2 Auswertung der Leistungsspektren	23
3.7.3 Statistische Auswertung	24
3.7.4 Kriterien für signifikante Leistungsunterschiede	24
4. Ergebnisse	27
4.1 Darstellung der Ergebnisse	27
4.2 Hypothese A: Leistungsspektren der vorletzten Nacht G der Basisstudie	28
4.3 Hypothese B: Leistungsspektren der Nächte B, C und H der Probandengruppe B (ohne Exposition)	32
4.4 Hypothese C: Leistungsspektren der Nächte B, C, H und N der Probandengruppe C (ohne Exposition)	33
4.5 Hypothese D: Leistungsspektren der ersten zwei Schlafzyklen der Nächte B und C der Basisstudie	36
4.5.1 Zeitliche Entwicklung der Leistungsspektren zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe der Basisstudie der Nacht C	36
4.5.2 Zeitliche Entwicklung der Leistungsspektren zwischen den Nächten B und C der Expositionsgruppe der Basisstudie	37
5. Diskussion	38
6. Zusammenfassung	45
7. Literaturverzeichnis	49
Danksagung	52
Lebenslauf	53

1. Einleitung

Über mögliche Schädigungen der menschlichen Gesundheit durch elektromagnetische Felder wird seit vielen Jahren diskutiert. Ein Auslöser dafür war ein Bericht von Wertheimer und Leeper [Wertheimer, Leeper, 1979]. In ihrer retrospektiven epidemiologischen Studie stellten sie fest, dass das Risiko von Kindern, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen aufwuchsen, an Krebs zu erkranken, um das Zwei- bis Dreifache gegenüber dem Durchschnitt der Bevölkerung erhöht war. Diese Aussage konnte jedoch in keiner der nachfolgenden Studien bekräftigt werden [Morgan et al., 2000; Rothman, 2000].

Mit der flächendeckenden Einführung der GSM-Mobilfunknetze in Deutschland Anfang der 1990er Jahre ist die Frage nach möglichen, auf die hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks zurückzuführenden, gesundheitlichen Auswirkungen zunehmend in das Bewusstsein der Bevölkerung getreten. Es wurden neue Vorschriften wie die DIN/VDE 0848 und neue Sicherheitsbestimmungen [BImSchV, 1996] erlassen, in denen u.a. auch neue Grenzwerte festgelegt waren. Allerdings berücksichtigten diese nur die so genannten thermischen Effekte elektromagnetischer Felder.

Mobile Telefone senden im Gesprächsbetrieb eine elektromagnetische Strahlung aus, die von biologischem Gewebe, welches zu einem Großteil aus Wasser besteht, absorbiert wird. Dies führt zu einem Temperaturanstieg des Wassers, dem thermischen Effekt. Lipman zeigte, dass ein Temperaturanstieg von weniger als 1 °C ungefährlich für jedes biologische Gewebe ist [Lipman et al., 1988], welches die gegenwärtige Generation der Mobiltelefone generell unterschreitet [Van Leeuwen et al., 1999]. Gesundheitliche Schäden aufgrund von thermischen Effekten moderner Mobiltelefone können daher ausgeschlossen werden.

Neben den thermischen Effekten kann es auch zu nicht thermischen Wechselwirkungen elektromagnetischer Felder mit biologischem Gewebe kommen. Tierstudien zeigten einen Zusammenhang zwischen der Veränderung der elektrischen Hirnaktivität und der Einwirkung von Mikrowellen [Bell et al., 1992; Vorobyov et al., 1997].

Die Funktionen des menschlichen Organismus basieren größtenteils auf elektromagnetischen Prozessen. Ein Beispiel hierfür ist die Fortleitung von Aktionspotentialen in Nervenzellen. Es wird angenommen, dass von außen auf den Organismus einwirkende elektromagnetische Felder wie auch im Tierversuch mit innerer biologischer elektrischer Aktivität interferieren können.

Seit 1929 ist es möglich, die elektrische Aktivität des Gehirns in Form eines Elektroenzephalogramms (EEG) aufzuzeichnen [Berger, 1929]. Mit dieser von Hans Berger entwickelten Methode lassen sich die unterschiedlichen Grade des Wachseins (von angespannt bis entspannt) sowie die verschiedenen Phasen und Qualitäten des Schlafes charakterisieren.

Das menschliche Wach-EEG ist im allgemeinen sehr anfällig für Störungen. Schwankungen in der Konzentration des Probanden, dessen Grad der Entspannung sowie interindividuelle Effekte beeinflussen das Wach-EEG. Regelmäßigere Signale sind während der Schlafableitung zu gewinnen. Der menschliche Schlaf ist ein komplexer biologischer Prozess, der vom zentralen Nervensystem gesteuert wird. Eine polysomnographische Ableitung zeigt ein charakteristisches Schlafmuster im Verlauf der Nacht, unterteilt in verschiedene Schlafzyklen mit unterschiedlichen Schlafstadien. Äußere Einflüsse können zu Veränderungen in diesem Schlafmuster führen und sowohl die Schlafqualität als auch das Wohlbefinden am darauf folgenden Tag beeinflussen. Neben der Aufmerksamkeit, der Konzentration, dem Antrieb und der Stimmung ist der Schlaf wichtig für das Lernen und das Gedächtnis.

Es liegt daher nah, dass die oszillierenden elektromagnetischen Felder moderner Mobiltelefone mit der elektrischen Aktivität des Gehirns wechselwirken und somit einen Einfluss auf den Schlaf haben. Neue Schlaflabor-Studien zeigten einige geringfügige Effekte [Borbély et al., 1999; Mann und Röschke, 2004; Loughran et al., 2005; Altpeter et al., 2006]. Jedoch gibt es bis zum heutigen Zeitpunkt sehr wenige systematische Studien, die sich mit den Kurzeiteffekten, und bisher nur zwei Arbeiten, die sich mit den Langzeiteffekten der elektromagnetischen Felder moderner Mobiltelefone und den Auswirkungen auf den menschlichen Schlaf beschäftigt haben [Mann und Röschke, 1996; Wagner et al., 1998; Huber et al., 2003; Wachter, 2005; Fritzer et al., 2007].

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine Fortsetzung der Arbeit von Wachter [Wachter, 2005] über die Untersuchung von Lang- und Kurzeiteffekten elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf das Frequenzspektrum des Schlafelektroenzephalogramms.

In Wachters Studie schliefen die 20 männlichen Probanden in jeweils acht aufeinander folgenden Nächten in einem Schlaflabor. Randomisiert und doppelblind waren die Testpersonen einer Expositions- und einer Kontrollgruppe zugeteilt. Die Expositionsgruppe war nach einer Adaptations- und einer weiteren Referenznacht die restlichen sechs Nächte einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt. Der Kopf der Probanden befand sich hierbei

innerhalb eines gleichmäßigen elektromagnetischen Feldes, welches dem eines Mobiltelefons im Gesprächsbetrieb nachempfunden war, das neben dem Kopfkissen des Schlafenden lag. Die Kontrollgruppe schlief alle acht Nächte ohne diese Exposition.

Wachter fand heraus, dass in der Expositionsgruppe in der achten Nacht noch ein Erholungsbedarf von einem durch die Adaptationsnacht bedingten Schlafdefizit bestand, während in der Kontrollgruppe in der achten Nacht eine Normalisierung eingetreten war [Wachter, 2005]. Als Fazit zog Wachter, dass ein eingeschaltetes Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb neben dem Kopfkissen keine Schlafstörung an sich produziert, aber die natürliche Erholung von anderweitig bedingten Schlafstörungen verhindert oder verlangsamt.

Wenn die Theorie von Wachter stimmt, dann muss der beschriebene Effekt bereits in den ersten sieben Nächten zu beobachten gewesen sein, wenn auch möglicherweise in abgeschwächter Form. Hieraus entwickelte sich die **Hypothese A** dieser Folgestudie:

Der in der Kontrollgruppe der Basisstudie von Wachter gemessene Langzeiteffekt ist ein tatsächlicher Einfluss der elektromagnetischen Strahlung, welcher sich kontinuierlich mit zunehmender Anzahl der Ableitnächte immer deutlicher manifestiert.

Es ist auch denkbar, dass die Ergebnisse von Wachter darauf zurückzuführen sind, dass die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt war. Daraus ergab sich die **Hypothese B** dieser Folgestudie:

Die Anzahl der Probanden in der Studie von Wachter war zu gering, weshalb die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt werden konnte.

In der Basisstudie von Wachter zeigte sich ein verändertes Spektrum in der letzten Nacht. Neben der Aussage der Hypothese A lässt diese Beobachtung auch die **Hypothese C** zu:

Nach einer Langzeituntersuchung hat die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf.

Die Borbély-Studie [Borbély et al., 1999] untersuchte die Auswirkungen eines viertelstündlich abwechselnd ein- bzw. ausgeschalteten elektromagnetischen Feldes auf einzelne Schlafzyklen. Sie beobachteten eine signifikante Verkürzung der Wachzeiten und fanden eine unter der Exposition in den ersten NonREM-Schlafphasen erhöhte spektrale

Leistung im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 11 Hz sowie im Bereich von 13,5 Hz und 14 Hz. Ähnliche Resultate erzielten Loughran et al. [Loughran et al., 2005].

Möglicherweise waren derartige Kurzzeiteffekte wie in der Borbély-Studie auch in dem in dieser Studie verwendeten Datenmaterial zu beobachten. Daraus ergab sich die **Hypothese D** dieser Folgestudie:

Die Resultate der Borbély-Studie sind mit den vorliegenden Daten annäherungsweise zu reproduzieren.

Mit der vorliegenden Studie sollten diese Theorien systematisch unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden. Dafür wurde teilweise auf das Datenmaterial der Basisstudie von Wachter zurückgegriffen. Für die Klärung der anderen Hypothesen schliefen Probanden in 8 oder 14 aufeinander folgenden Nächten im Schlaflabor. Die Studie war doppelblind für die Bedingung der Exposition versus Nicht-Exposition durch das elektromagnetische Feld.

2. Grundlagen

2.1 Elektrophysiologie des Gehirns

Die Erforschung der Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf das zentrale Nervensystem hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Dabei spielt die spezielle Physiologie der Gehirnrinde eine große Rolle, deren polarisierende Zellaktivität elektromagnetische Felder erzeugt.

1929 entdeckte Hans Berger [Berger, 1929] mit dem Elektroenzephalogramm (EEG) eine Methode, mit der sich die elektrische Aktivität des Gehirns messen lässt. Oberflächenelektroden, die an definierten Stellen der Kopfhaut platziert werden, nehmen die elektrische Aktivität der Großhirnrinde in Form von Potentialschwankungen auf. Diese sogenannten Hirnströme ergeben sich aus den Summenpotentialen von Nervenzellverbänden und rufen ein schwaches elektromagnetisches Feld in der Umgebung des Gehirns hervor.

Es wird davon ausgegangen, dass das empfindliche elektromagnetische Gleichgewicht innerhalb des Gehirns durch von außen einwirkende elektromagnetische Felder beeinflusst werden kann. Verschiedene Untersuchungen auf zellulärer Ebene zeigten Wechselwirkungen von elektromagnetischen Feldern in biologischen Systemen. Beispielsweise löste die Exposition von Zellkulturen einen messbaren Kalziumausstrom aus Nervenzellen aus [Blackman et al., 1979]. Des Weiteren wurde der elektromagnetische Einfluss u.a. auf die Neurotransmitterfreisetzung [Lai et al., 1989], die Zellproliferation [Cleary et al., 1990] sowie die Blut-Hirn-Schranke [Perrson et al., 1997] erforscht.

2.2 Schlafphysiologie

Schlaf ist definiert als ein regelmäßig wiederkehrender physiologischer Erholungszustand mit Veränderungen der Körperfunktionen und der Bewusstseinslage durch das Überwiegen des Parasympathikus. Es besteht eine herabgesetzte Reaktion auf äußere Reize, jedoch im Gegensatz zur Narkose eine jederzeitige Weckbarkeit [Pschyrembel, 2002].

Die verschiedenen Grade des Wachseins (von angespannt bis entspannt) sowie die unterschiedlichen Phasen und Qualitäten des Schlafes lassen sich mit Hilfe des EEGs nachweisen. Dieses erlaubt, den Schlafverlauf kontinuierlich aufzuzeichnen, ohne dabei den Schlafenden selbst zu stören. Die Elektroden an der Kopfhaut leiten die Signale an einen Polysomnographen weiter, der sie verstärkt, filtert und aufzeichnet. Das Wach-EEG ist sehr

anfällig für Störungen durch z.B. Schwankungen der Konzentration und den Grad der Entspannung des Probanden. Regelmäßigere Signale erhält man während der Schlafableitung. Eine Standard-Polysomnographie beinhaltet neben dem EEG auch das Elektromyogramm (EMG), welches den Spannungszustand eines Muskels (Muskeltonus) registriert und das Elektrokulogramm (EOG), das Augenbewegungen erfasst. Rechtschaffen und Kales stellten 1968 gemeinsam mit mehreren führenden Schlafforschern Richtlinien zur Schlafstadienklassifikation auf [Rechtschaffen, Kales, 1968]. Dies führte weltweit zur Etablierung und zur vereinheitlichten Definition von Schlafstadien und Schlafstrukturen. Als Grundlage dienten ihnen zusammengefasste Informationen aus EEG, EMG und EOG über Zeitintervalle von 20 bis 30 Sekunden Dauer, den sogenannten Epochen.

In ihrem Handbuch definierten Rechtschaffen und Kales die nachfolgend beschriebenen sechs Schlafstadien, die typisch sind für gesunde, junge Erwachsene.

2.2.1 Stadium wach

Kurz vor und nach dem Schlaf tritt der entspannte Wachzustand auf. Ebenso kann es während des Schlafes zu kurzen Wachmomenten kommen. Im wachen, aber unaufmerksamen Zustand mit geschlossenen Augen liegt zu mehr als 50 % einer Epoche ein Rhythmus mit einer Frequenz von 7,5 bis 12,5 Hz vor. Diese Wellen werden α -Wellen (Alpha-Wellen) genannt. Im EOG lassen sich oft schnelle Augenbewegungen beobachten. Das EMG zeigt einen hohen Muskeltonus.

2.2.2 Schlafstadium I

Dieses Stadium wird auch Einschlafstadium genannt, da das Bewusstsein zunehmend eingeschränkt wird. Im EEG nimmt der Anteil der Alpha-Wellen ab, in einer Epoche treten zu über 50 % sogenannte θ -Wellen (Theta-Wellen, 3,5 bis 7,5 Hz) und unregelmäßige β -Wellen (Beta-Wellen, 12,5 – 30 Hz) auf. Charakteristischerweise kommen hochamplitudige scharfe Zacken mit einer Frequenz von 4 – 5 Hz vor. Sie werden als Vertexzacken bezeichnet, da sie besonders gut über dem Scheitel (lat.: vertex) aufgezeichnet werden können. Das EOG zeigt langsam rollende Augenbewegungen. Der Muskeltonus nimmt etwas ab, es können „Einschlafzuckungen“ auftreten. Dieses Stadium ist noch ein instabiler Zustand, der leicht durch kurze Wachmomente unterbrochen werden kann.

2.2.3 Schlafstadium II

Der Beginn dieses Stadiums ist als der eigentliche Zeitpunkt des Einschlafens anzusehen. Das Auftreten der ersten Schlafspindeln oder K-Komplexe definiert das Schlafstadium II. Schlafspindeln sind Sigma-Wellen mit einer Frequenz von 12 – 14 Hz und einer Dauer von 0,5 – 1,5 Sekunden. Bei K-Komplexe handelt es sich um zweiphasige, zuerst negative δ -Wellen (Delta-Wellen, 0,5 – 4 Hz), an die sich eine langsame, positive Komponente anschließt. K-Komplexe dauern mindesten 0,5 Sekunden an. Typischerweise treten Theta-Wellen und weniger als 20 % Delta-Wellen auf. Im EOG sind keine Augenbewegungen zu erkennen, das EMG zeigt eine weitere Abnahme des Muskeltonus.

2.2.4 Schlafstadium III

Eine Epoche wird diesem Stadium zugeordnet, wenn sie 20 – 50 % Delta-Wellen enthält, die eine Amplitude von mindestens 75 μ V haben. Auch Schlafspindeln und K-Komplexe lassen sich beobachten, allerdings ist ihr Auftreten deutlich seltener als im Schlafstadium II. Im EOG sind keine Augenbewegungen zu sehen, der Muskeltonus ist niedrig.

2.2.5 Schlafstadium IV

Charakteristischerweise besteht eine Epoche dieses Stadiums zu über 50 % aus Delta-Wellen. Ansonsten ähnelt dieses Schlafstadium dem Stadium III. Diese beiden Stadien werden zusammen auch als Tiefschlaf oder Slow-Wave-Sleep (SWS) bezeichnet, in dem gesunde Menschen besonders schwer aufzuwecken sind.

2.2.6 Schlafstadium REM

Etwa 70 bis 90 Minuten nach dem Einschlafen kommt es zur ersten REM-Schlaf-Phase. Der Begriff REM-Schlaf resultiert aus der Beobachtung rascher Augenbewegungen (engl.: rapid-eye-movements) im EOG. Dem REM-Schlaf werden alle übrigen Schlafstadien als NonREM-Schlaf gegenübergestellt, da im NonREM-Schlaf nur wenige oder gar keine Augenbewegungen registriert werden.

Das EEG im REM-Schlaf gleicht dem im Schlafstadium I. Es kommen sogenannte Sägezahnwellen vor, die besonders häufig über dem Stirn- und Scheitelbereich auftreten und eine ähnliche Frequenz wie die Theta-Wellen haben. Typisch für den REM-Schlaf ist ein

stark reduzierter Muskeltonus. Häufig lässt sich ein Anstieg des Blutdrucks, der Herz- und der Atemfrequenz beobachten. Ein gesunder Erwachsener verbringt etwa 25 % des Schlafes in diesem Stadium.

Die einzelnen Schlafstadien werden im Verlauf einer Nacht mehrmals durchlaufen (siehe Abbildung 2.1). Ihre Reihenfolge ist nicht zufällig. Unter physiologischen Bedingungen werden die Schlafphasen immer in derselben Abfolge durchschritten. Ausgehend vom Stadium wach erreicht der gesunde Schlafende über die Stadien I und II den Tiefschlaf. Dieser geht nach einem kurzen Aufenthalt im Schlafstadium II in die erste REM-Schlaf-Phase über, womit der erste vollständige Schlafzyklus abgeschlossen ist. Normalerweise treten während eines acht Stunden Schlafes vier bis fünf derartige Zyklen mit einer Dauer von jeweils 80 bis 110 Minuten auf. Das Muster der Schlafzyklen verändert sich im Laufe der Nacht.

Der Anteil der Stadien III und IV an den ersten beiden Schlafzyklen ist am größten. Mit zunehmender Schlafdauer werden die beiden Stadien immer seltener erreicht, am Morgen überwiegt das Leichtschlafstadium II.

Der Anteil der REM-Schlaf-Phasen nimmt im Verlauf einer Nacht zu. Im ersten Schlafzyklus dauert die REM-Phase ca. 10 Minuten, gegen Morgen 20 bis 30 Minuten.

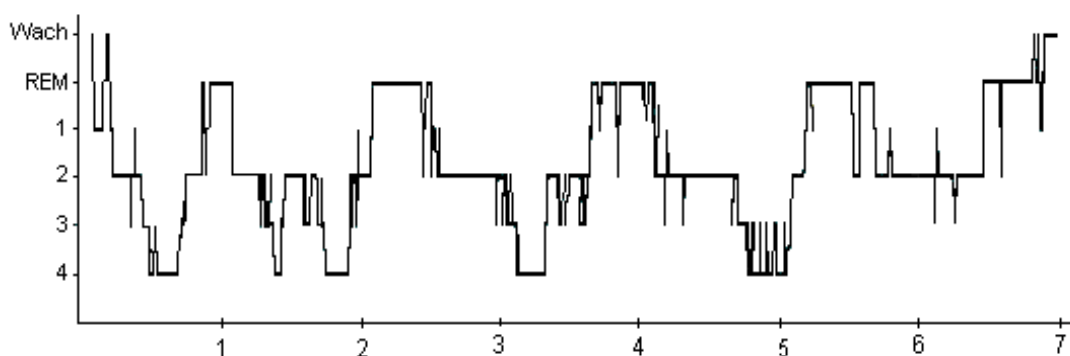


Abb. 2.1: Schlafprofil einer jungen gesunden Versuchsperson (m, 32 J.) nach [Wachter, 2005].

Sowohl der Schlafbedarf als auch die Schlafdauer sind altersabhängig. Ein Neugeborenes schläft ungefähr 16 Stunden täglich. Ein Kleinkind benötigt ca. zwölf Stunden Schlaf. Gesunde Erwachsene verbringen sieben bis neun Stunden schlafend, ältere Menschen kommen oft mit sechs Stunden Schlaf pro Tag aus. Allerdings ist das Schlafbedürfnis

individuell sehr verschieden, diese Zeitangaben sind daher als Durchschnittswerte zu verstehen.

Auch die Anteile von REM- und NREM-Schlaf an der Gesamtschlafzeit machen eine typische Altersentwicklung durch. Ein Neugeborenes verbringt knapp die Hälfte seines Schlafes in der REM-Phase. Bei Erwachsenen macht diese Schlafphase ungefähr ein Viertel des Schlafes aus. Im Alter sinkt der Anteil der REM-Schlaf-Phasen auf ca. 20 %. Auch der relative Anteil des Tiefschlafes nimmt im Laufe des Lebens auf zehn bis 20 % ab. Die Dauer der Stadien I und II verlängert sich dagegen ab dem 14. Lebensjahr. Beim gesunden Erwachsenen machen sie gut die Hälfte der Gesamtschlafzeit aus.

Verschiedene Faktoren können einen negativen Einfluss auf den Schlaf haben. Innere Ursachen wie z.B. Sorgen, Stress, Angst und Konflikte, aber auch äußere Faktoren wie z.B. Lärm oder Schichtarbeit wirken sich ungünstig auf die Schlafqualität aus. Wiederholte Störungen des gesunden Schlafablaufes können das Wohlbefinden an den darauffolgenden Tagen bedeutend beeinträchtigen. Auch die Aufmerksamkeit oder die Konzentration, der Antrieb und die Stimmung können gestört sein. Schlafen und Wachsein sind keine voneinander unabhängigen Abläufe, sondern beeinflussen sich gegenseitig und sind eng miteinander verknüpft. Der Schlaf, besonders der REM-Schlaf ist wichtig für das Lernen und das Gedächtnis.

2.3 Leistungsspektren

Die Bestimmung der beschriebenen Schlafstadien nach Rechtschaffen und Kales ist ein Bestandteil einer jeden Schlafanalyse. Insbesondere sind hierbei die Anteile der Frequenzbänder (Delta-, Theta-, Alpha- und Beta-Bänder) im EEG-Signal von Bedeutung (vergleiche Abschnitt 2.2). Diese Anteile lassen sich mit Hilfe der sogenannten Leistungsspektren (engl.: power spectrum) charakterisieren. Ein Leistungsspektrum ordnet jeder Frequenz bzw. jedem Frequenzbereich die zugehörige Leistung (Energie pro Zeiteinheit) des Signals zu. Berechnet wird das Leistungsspektrum in der Regel über die sogenannte Fouriertransformation, benannt nach dem französischen Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier, der diese Methode 1822 entwickelte.

Die Fourieranalyse beschreibt das Zerlegen eines beliebigen periodischen Signals in eine Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen. Viele physikalische Vorgänge lassen sich durch solche Summen darstellen oder annähern. Das einfachste Beispiel hierfür sind Schwingungen,

i.e. periodische Veränderungen physikalischer Größen. Freie, ungedämpfte, harmonische Schwingungen werden durch eine einzige Sinus- oder Kosinusfunktion beschrieben:

$$(1) \quad y(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad \text{bzw.} \quad y(t) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \zeta\right)$$

mit der Amplitude A , der Periodendauer T , der Phase φ bzw. ζ und der Kreiszahl $\pi = 3,14159\dots$. $\nu = 2\pi / T$ ist hierbei die Frequenz der harmonischen Schwingung. Abbildung 2.2. zeigt eine sinusförmige Schwingung mit einer positiven Phasenverschiebung gegenüber dem Zeitnullpunkt.

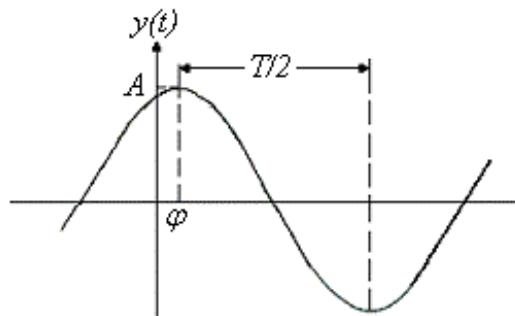


Abb. 2.2: Sinusförmige Schwingung mit positiver Phasenverschiebung.

Mehrere harmonische Schwingungen überlagern sich nach dem Superpositionsprinzip, d.h. die Amplituden aller Schwingungen werden zu jedem Zeitpunkt addiert. Als Extremfälle treten hierbei die maximale Verstärkung und die Auslöschung auf (siehe Abbildung 2.3). Bei gleicher Frequenz und gleicher Phase addieren sich die Amplituden der Schwingungen maximal, bei gleicher Frequenz, gegenläufiger Phase und gleicher Amplitude löschen sie sich aus.

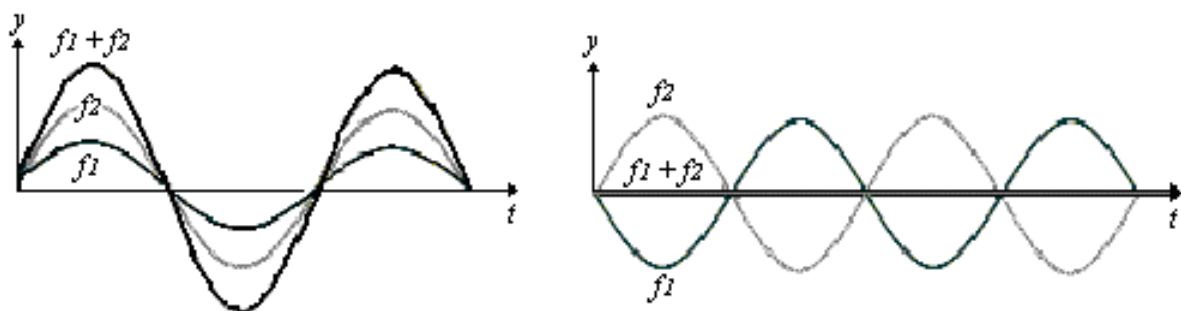


Abb. 2.3: Maximale Verstärkung (links) und Auslöschung von Schwingungen (rechts).

Die Überlagerung mehrerer harmonischer Signale unterschiedlicher Frequenz und Amplitude führt zu einer periodischen aber zumeist unharmonischen Schwingung. Durch eine (unendliche) Summe von harmonischen Funktionen lässt sich sogar ein jedes beliebiges Signal annähern. Insbesondere ist die Approximation komplexer EEG-Signale möglich.

Mit Hilfe der Fouriertransformation gelingt es, die komplexen Signale f in die sie annähernde (unendliche) Summe der Sinus- und Kosinusfunktionen zu zerlegen:

$$(2) \quad f(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n \nu t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n \nu t),$$

wobei A_n und B_n die Amplituden und $n \cdot \nu$ die ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz ν der Sinus- bzw. Kosinusfunktionen sind.

Die Darstellung der Amplituden in Abhängigkeit von der Frequenz wird als Amplitudenspektrum bezeichnet. Periodische Funktionen besitzen eine endliche Anzahl von Amplituden größer Null. Das zugehörige Spektrum ist diskret und weist nur einzelne Linien im Abstand $1 / \text{Periodenlänge}$ auf. Ein kontinuierliches Spektrum ist durch eine durchgängige Kurve über alle Frequenzbereiche gekennzeichnet (siehe Abbildung 2.4) und tritt bei nichtperiodischen Funktionen auf.

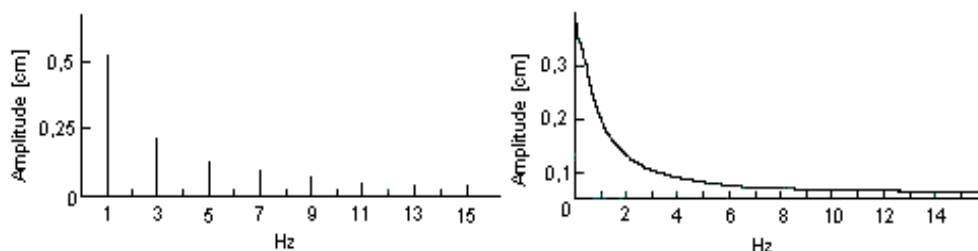


Abb. 2.4: Beispiel für ein diskretes (links) und ein kontinuierliches Spektrum (rechts) nach [Wachter, 2005].

Numerisch erfolgt die Berechnung des Amplitudenspektrums üblicherweise mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation (DFT). Das zu analysierende Signal wird als zeitdiskret und periodisch angenommen. Cooley und Tukey [Cooley, Tukey, 1965] entwickelten mit der schnellen Fouriertransformation (FFT) ein Verfahren, die DFT sehr schnell zu ermitteln.

Die Fourieranalyse wurde in dieser Arbeit auf die EEG-Signale innerhalb der einzelnen Epochen angewandt. Die Epochenlänge betrug 30 s. Implizit setzt die FFT voraus, dass das Signal innerhalb der 30 s periodisch ist und durch Aneinanderreihung der Daten der 30 s unendlich oft wiederholt wird. In der Regel kommt es dabei zu Diskontinuitäten an den

Epochenrändern, da die Signale unterschiedliche Amplituden am Anfang und am Ende der Epoche haben. Diese Unstetigkeit führt im Spektrum zu einer Verbreiterung der Spektrallinien. Zur Reduktion dieses Effektes können die Signale vor der Anwendung der FFT mit einer Fensterfunktionen multipliziert werden, die symmetrisch ist und an den Fenstergrenzen den Wert Null hat. In dieser Arbeit kam ein Hanning-Fenster zum Einsatz (Abbildung 2.5).

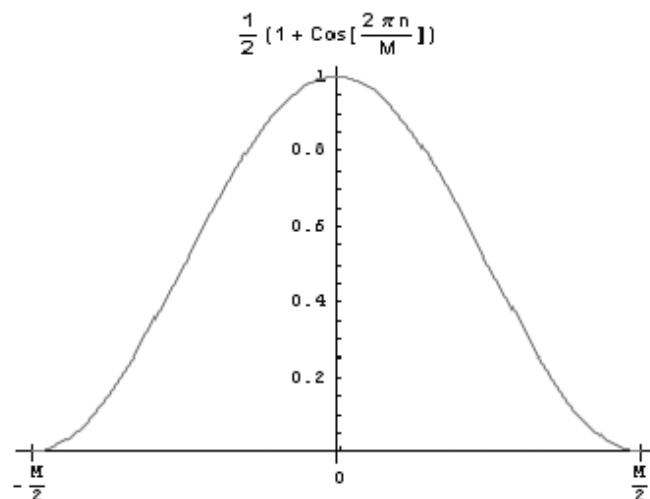


Abb. 2.5: Hanning-Fensterfunktion.

Das Leistungsspektrum stellt die Abhängigkeit der Amplitudenquadrate der DFT von der Frequenz dar. Nach dem Parseval-Theorem entspricht die Summe der Amplitudenquadrate der DFT der Gesamtleistung, genauer der mittleren quadratischen Leistung des ursprünglichen Signals f :

$$(3) \quad \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 + B_n^2).$$

Aufgrund dieser Beziehung gelingt es, den Anteil einer bestimmten Frequenz an der Gesamtleistung zu ermitteln.

Durch die Mittelung über die Epochendauer geht bei der Fourieranalyse eines EEG-Signals jede Zeitinformation verloren. Es ist nicht möglich festzustellen, zu welchem Zeitpunkt der Epoche eine Ereignis stattgefunden hat, das beispielsweise zu einer Leistungserhöhung im Spektrum bei einer bestimmten Frequenz führte.

2.4 Leistungsspektren und Frequenzbänder

Die Analyse einer EEG-Ableitung ergibt für den Wachzustand und für die Schlafstadien charakteristische Spektren. In jedem Schlafstadium dominieren verschiedene Frequenzbänder, weshalb sich auch die Leistungsspektren dieser Stadien unterscheiden.

Beispielsweise herrscht im Wachzustand das Alpha-Frequenzband (7,5 – 12,5 Hz) vor. Die DFT liefert ein Spektrum, bei dem Frequenzen um 10 Hz überwiegen.

Mit Hilfe der Fourieranalyse lassen sich die einzelnen Schlafstadien voneinander abgrenzen.

In dieser Studie lag die Aufmerksamkeit auf den folgenden Frequenzbändern:

- Delta-Band: 1 – 3,5 Hz
- Theta-Band: 3,5 – 7,5 Hz
- Alpha-Band: 7,5 – 12,5 Hz
- Beta1-Band: 12,5 – 15 Hz
- Beta2-Band: 15 – 26 Hz
- Beta3-Band: 26 – 30 Hz

Die Frequenzbänder Beta1, Beta2 und Beta3 werden zum Beta-Band zusammengefasst.

3. Methodik

3.1 Probandenkollektiv

In die weiterführende Studie wurden insgesamt zwölf gesunde Männer im Alter von 20 bis 50 Jahren aufgenommen. Davon hatten bereits vier Personen an der Erststudie teilgenommen. Die Untersuchungsgruppe beschränkte sich auf ein männliches Klientel, weil bei Frauen die Veränderungen des weiblichen Hormonhaushaltes innerhalb eines Monats nachweislich Einfluss auf den Schlaf haben [Driver et al., 1996].

Das Alter der Studienteilnehmer betrug 20 bis 50 Jahre, da die Schlafparameter innerhalb dieser Altersgruppe gut vergleichbar sind [Haimov, Lavie, 1997]. Haimov und Lavie fanden heraus, dass sich die Gesamtschlafdauer, die Schlaftiefe sowie das Verhältnis von REM- zu NonREM-Schlaf im Laufe des Lebens verändert.

Ein weiteres Kriterium für die Wahl der Altersgruppe war, dass der eine große Anzahl der Mobiltelefonnutzer der Altersgruppe der 20- bis 50jährigen zuzuordnen ist.

Weder in der Krankengeschichte der Probanden noch in der ihrer Familien durften psychiatrische Erkrankungen vorgekommen sein. Zudem mussten die Studienteilnehmer körperlich gesund sein. Dies wurde durch ein ausführliches Gespräch, eine internistische, eine neurologische sowie eine psychiatrische Untersuchung vor Beginn der Versuchsphase gesichert. Um eine Schlafstörung auszuschließen, wurde im Rahmen dieser Untersuchungen gezielt nach den Schlafgewohnheiten gefragt. Auch das Schlaf-EEG der ersten Nacht ging in die Beurteilung mit ein.

Eine große Stressbelastung der Kandidaten (z.B. eine Prüfung in naher Zukunft) war ein Ausschlusskriterium für die Studienteilnahme. Des weiteren durfte dem Versuchsbeginn kein außergewöhnliches Lebensereignis (wie z.B. der Tod eines nahen Angehörigen oder die Trennung vom Partner) vorausgegangen sein. Schichtarbeiter und Leistungssportler wurden in diese Studie nicht aufgenommen. Zusätzliche Ausschlusskriterien waren starkes Rauchen, chronischer Alkoholkonsum sowie die Einnahme von Drogen oder schlafbeeinflussenden Medikamenten, auch in der Vorgeschichte. Zur Kontrolle der Ausschlusskriterien gaben die Probanden nach der ersten Nacht ihren Morgenurin ab, der dann in einem Drogentest auf Benzodiazepine, Cannabinoide, Kokain, Opiate, Amphetamin/Metamphetamin, Barbiturate und Methadon hin untersucht wurde. Die Testpersonen erhielten die Anweisung, dass sie während der Studie keinen Alkohol trinken durften und einen möglichst regelmäßigen Lebensrhythmus führen sollten.

3.1.1 Probandengruppen

Die unterschiedlichen Theorien der Hypothesen A bis D erforderten eine Unterteilung des Probandenkollektivs.

Probandengruppe A: In der Basisstudie wurde der Schlaf von insgesamt 20 Probanden untersucht. Zehn Probanden waren ab der dritten Nacht (Nacht C) dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, zehn weitere Testpersonen dienten als Kontrollgruppe und schliefen alle acht Nächte ohne Exposition. Wachter beobachtete sowohl in der Expositions- als auch in der Kontrollgruppe nach sechs Nächten (in der Nacht H) eine signifikante Leistungsabnahme im Delta-Frequenzband im Schlafstadium III [Wachter, 2005]. Weitaus stärker war dies bei der Kontrollgruppe ausgeprägt, bei der sich zusätzlich eine Leistungszunahme im Alpha-Frequenzband des REM-Schlafes zeigte. Um zu überprüfen, ob es sich hierbei um einen Langzeiteffekt handelt, der sich kontinuierlich mit zunehmender Anzahl der Ableitnächte manifestiert, wurde in dieser Studie zusätzlich die vorletzte Ableitnacht (Nacht G) aus der Basisstudie im Vergleich zu der Nacht B betrachtet, d.h. die Probandengruppe war mit der der Basisstudie identisch.

Probandengruppe B: Sechs Probanden schliefen in dieser Studie acht aufeinander folgende Nächte, ohne dass sie einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt waren. Vier dieser Probanden nahmen bereits an der vorangegangenen Studie in der Expositionsgruppe teil. Hierdurch ließ sich ein Cross-Over-Design teils realisieren. Wie in der Basisstudie wurden die Schlafableitungen der Nächte C und H mit der Nacht B verglichen. Auf diese Weise vergrößerte sich die Kontrollgruppe der Basisstudie um sechs Testpersonen. Mögliche Effekte aufgrund einer zu geringen Probandenanzahl konnten überprüft werden.

Probandengruppe C: Um beurteilen zu können, ob nach einer Langzeituntersuchung die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf hat, schliefen in dieser Studie sechs Probanden anstelle von acht Nächten 14 Nächte in Folge im Schlaflabor. Die Leistungsspektren der Nächte C, H und N wurden mit denen der Nacht B verglichen.

Probandengruppe D: Diese Probandengruppe war mit der der Basisstudie identisch. Zur Verifikation der zeitlichen Abhängigkeit der spektralen Leistung von den Schlafzyklen ([Borbély, 1999]) wurden die Schlafzyklen eins und zwei der Nächten B und C aus dem Datenbestand der Basisstudie jeweils miteinander verglichen.

Die Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Probandengruppen und ihre wichtigsten Merkmale.

Hypothese	Probandenanzahl	Nächte	Exposition	Zyklen Betrachtung
A	10	8	✓	-
	10	8	-	-
B	6*	8	-	-
C	6	14	-	-
D	10	8	✓	✓
	10	8	-	✓

* davon 4 aus A mit Exposition

Tab. 3.1: Übersicht über die einzelnen Probandengruppen.

3.2 Versuchsaufbau

Um die gleichen Untersuchungsbedingungen wie in der vorangegangenen Studie zu gewährleisten, fanden die Nachtableitungen in demselben, besonders abgeschirmten Raum statt (Abb. 3.1). Dieser lag in einem Teil des Klinikgebäudes, der sich fernab von elektromagnetischen Störquellen wie z.B. Computertomographen befand.

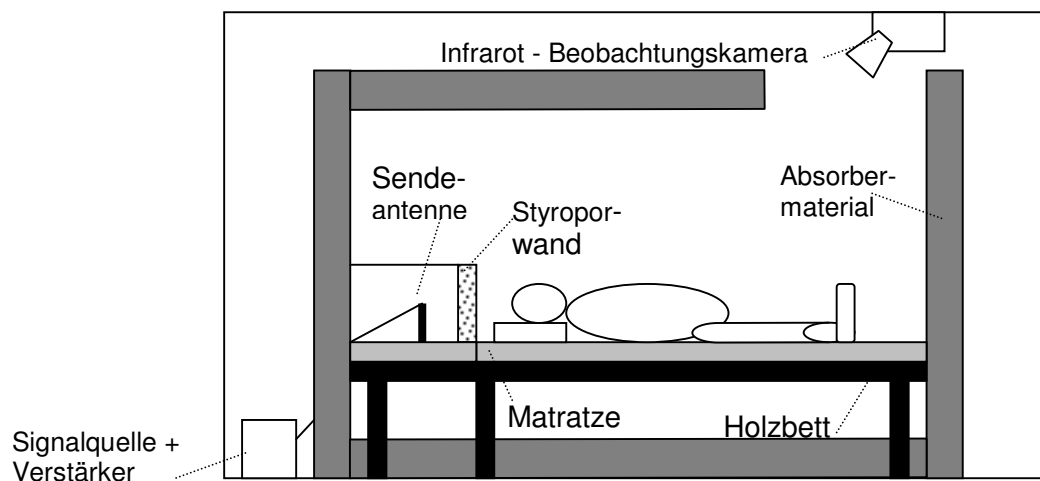


Abb. 3.1: Aufbau der reflexionsarmen Kammer nach [Wachter, 2005].

Der Boden, die Decke und die Wände des Zimmers bestanden aus Stahlbeton. In dem Raum wurde eine Holzkonstruktion aufgestellt, deren Innenwände mit elektromagnetisch absorbierendem Material verkleidet waren. Die Innenabmessungen dieser Kammer betragen 2,50 m × 1,80 m × 2,50 m (Länge × Breite × Höhe). Durch das absorbierende Material ließ

sich zum einen eine Reflexion des inneren elektromagnetischen Feldes weitestgehend vermeiden, zum anderen konnte der Einfluss äußerer elektromagnetischer Felder minimiert werden. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass keine überflüssigen Metallteile im Inneren der Kammer vorhanden waren.

In der Mitte der Kammer stand ein Holzbett mit einer Matratze aus Polyurethan (Länge \times Breite: 1,95 m \times 0,9 m). Die Sendevorrichtung für das elektromagnetische Feld bestand aus drei in einer Reihe angebrachten $\lambda/2$ -Dipol-Antennen. Diese befanden sich in einem Abstand von 30 cm auf Kopfhöhe des Probanden. Zwischen dem Kopfende des Bettes und der Sendeantenne diente eine Styroporplatte als Abstandshalter und zugleich als Sichtschutz.

Durch diese baulichen Maßnahmen war die Erzeugung eines möglichst ungestörten elektromagnetischen Feldes gewährleistet (Abb. 3.2.). Auch bei Bewegungen lag der Kopf des Probanden in diesem homogenen Feld. An der Decke des Raumes befand sich eine Infrarot-Kamera, die es ermöglichte, den Probanden die ganze Nacht über durch eine Aussparung im Deckenbereich der Holzkonstruktion beobachten zu können.

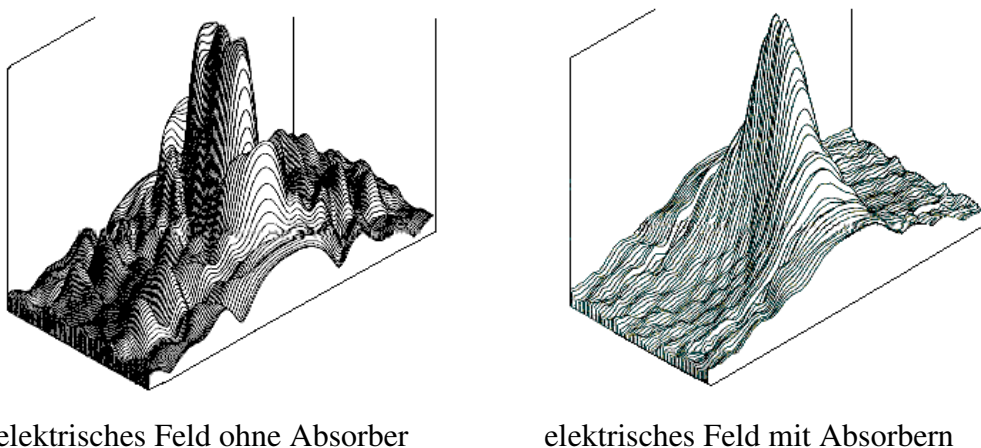


Abb. 3.2: In einem Modellversuch in der Kammer ermitteltes elektrisches Feld mit und ohne Auskleidung durch Absorberplatten (nach [Wachter, 2005]). Mit Absorbern entsteht ein gleichmäßiges, reproduzierbares elektrisches Feld durch geringere Reflexionen an den Wänden.

Die Sendeantenne war über ein Kabel mit dem Verstärker und der Hochfrequenz-Signalquelle verbunden. Die Quelle und der Verstärker befanden sich außerhalb der reflexionsarmen Kammer. Um das Summen der Hochfrequenz-Signalquelle im Betriebszustand zu überdecken, wurde mit einem Gerät ein leises Ventilationsgeräusch erzeugt. Auch bei Probanden, die keinem elektromagnetischen Feld ausgesetzt waren, d.h. bei denen die

Hochfrequenz-Signalquelle ausgeschaltet war, wurde das Ventilationsgeräusch erzeugt. Dadurch war es den Studienteilnehmern nicht möglich zu erkennen, ob eine Exposition vorlag oder nicht.

3.3 Erzeugung des elektromagnetischen Feldes

Bei dieser Art von Humanexperimenten müssen verschiedene Vorschriften wie z.B. DIN/VDE 0848 („Sicherheit in elektromagnetischen Feldern“) eingehalten werden, um die Gesundheit der Testpersonen nicht zu gefährden. Das Bundes-Immisionsschutzgesetz [BImSchV, 1996] legt Höchstwerte für die Absorption von Strahlungsleistung beim Menschen fest. Die absorbierte Strahlungsleistung in biologischem Gewebe wird als SAR (spezifische Absorptionsrate, Einheit: Watt / kg) bezeichnet. Im Bundes-Immisionsschutzgesetz werden Teilkörper- und Ganzkörper-SAR-Werte unterschieden. Die oberen Grenzwerte für Teilkörper- bzw. Ganzkörper-SAR-Werte liegen bei 20 mW / 10 g, bzw. bei 80 mW / kg. Diese dürfen nicht überschritten werden.

Aus diesem Grund führten Mitarbeiter des Lehrstuhls für Theoretische Elektrotechnik der Bergischen Universität – GH Wuppertal vor Versuchsbeginn der Basisstudie eine Feldmessung für ein homogenes Kopf- sowie für ein Körpermodell durch [Fritzer et al., 2007]. In der Simulation wurde die zu erwartende thermische Belastung der Probanden durch das elektromagnetische Feld gemessen.

Die mittlere abgestrahlte Leistung der in dieser Studie verwendeten Antennen betrug 25 Watt. Die Messungen der Spezifischen Absorptionsrate am Kopf der Probanden ergaben eine maximale über 1 g gemittelte SAR von 8,75 mW / 10 g. Eine thermische Wirkung auf das Gehirn war somit ausgeschlossen. Die Ganzkörper-SAR betrug 24 mW / kg. Der Einfluss der Silber-EEG-Elektroden auf der Kopfhaut konnte aufgrund des angesetzten Sicherheitsfaktors vernachlässigt werden.

Die in einem Abstand von 30 cm auf Kopfhöhe des Probanden angebrachte Sendevorrichtung ermöglichte eine optimale Verteilung mit guter Homogenität des elektromagnetischen Feldes. Auch bei Bewegungen lag der Kopf des Probanden in diesem homogenen Feld, da mit einer Sendeleistung der Antennen von 1 Watt ein ausreichend großes elektromagnetisches Feld mit maximaler Feldstärke erreicht wurde.

Die Signalquelle erzeugte ein synthetisches, linear polarisiertes GSM- (Global System for Mobile Communication) Signal, welches einen Gesprächsverlauf mit einem Mobiltelefon imitierte. Ein Trägersignal von 900 MHz wurde mit Frequenzen von 2 Hz, 8 Hz, 217 Hz und

1733 Hz sowie einer Pulsdauer von 577 μ s moduliert (für Details siehe [Schüller et al., 2000]).

3.4 Versuchsablauf

Zur ersten Nacht wurde der Proband gegen 21 Uhr in das Schlaflabor einbestellt. Es folgte die Begrüßung und ein ausführliches Gespräch mit Informationen zu dem Versuch und dessen Ablauf. Der Proband hatte dabei die Gelegenheit, Fragen zu stellen, und unterzeichnete im Anschluss an das Gespräch die Einverständniserklärung. Nach dieser Aufklärung überprüfte ein Arzt den gesundheitlichen Zustand des Probanden und erhob eine Anamnese. Gegen 21:45 Uhr begann die Befestigung der sechs Kopf- und sieben Hautelektroden.

Unter Berücksichtigung der Kriterien von Rechtschaffen und Kales [Rechtschaffen und Kales, 1968] wurde ein Elektroenzephalogramm (EEG) zur Darstellung der Hirnströme, ein Elektrokulogramm (EOG) zur Beschreibung der Augenbewegungen sowie ein Elektromyogramm (EMG) als Indikator für den Muskeltonus aufgezeichnet. Über ein Elektrokardiogramm (EKG) war die Kontrolle der Herzfrequenz möglich.

Diese Parameter wurden während der gesamten Bettzeit des Probanden von einer Nachtwache mit Hilfe eines Monitorsystems überwacht und aufgezeichnet. Eventuelle Schlafereignisse ließen sich so direkt dokumentieren. Gegen sieben Uhr wurde der Proband geweckt und die Elektroden wieder entfernt.

Die erste Nacht (Nacht A) diente der Adaptation an die Schlaflaborumgebung, bei der Versuchsauswertung wurden die in dieser Nacht erhobenen Daten nicht berücksichtigt. Erst ab der zweiten Nacht (Nacht B) entstanden auswertbare Schlafdaten. Die Nacht B diente als Referenznacht. Die Nacht C war die erste Nacht mit eventueller Exposition.

3.5 Ableitschema

Das Ableitungsmuster war in allen Nächten gleich. Standardmäßig wurde der Kopf nach dem internationalen 10-20 Registrationsschema [Jasper, 1958] ausgemessen. Mit Hilfe dieses Schemas war es möglich, die sechs Silberelektroden jede Nacht reproduzierbar an denselben Stellen der intakten Kopfhaut zu befestigen. Als Klebstoff wurde eine Kollodium-Paste verwendet.

Gemäß der internationalen Klassifikation bezeichneten F3, C3 und P3 die EEG-Elektroden auf der linken Schädelhälfte und F4, C4 sowie P4 diejenigen auf der rechten Schädelhälfte (siehe Abb. 3.3). Durch diese Anordnung gelang es, sowohl ein frontales (F3, F4), ein

zentrales (C3, C4) als auch ein parietales (P3, P4) Hirnareal abzudecken, um eventuelle lokale Unterschiede in der Hirnaktivität feststellen zu können.

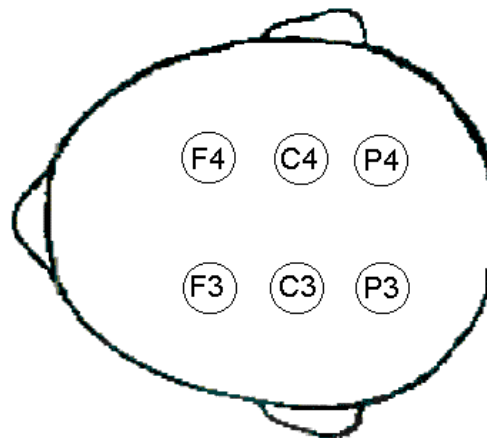


Abb. 3.3: Positionen des sechs EEG-Elektroden nach [Wachter, 2005].

Die sieben Hautelektroden waren wie folgt angeordnet: eine Elektrode befand sich in der Mitte der Stirn, jeweils eine war hinter jedem Ohr (auf dem Mastoid) befestigt, eine war oberhalb des linken Auges, eine unterhalb des rechten Auges festgeklebt und zwei waren unter dem Kinn angebracht (siehe Abb. 3.4).

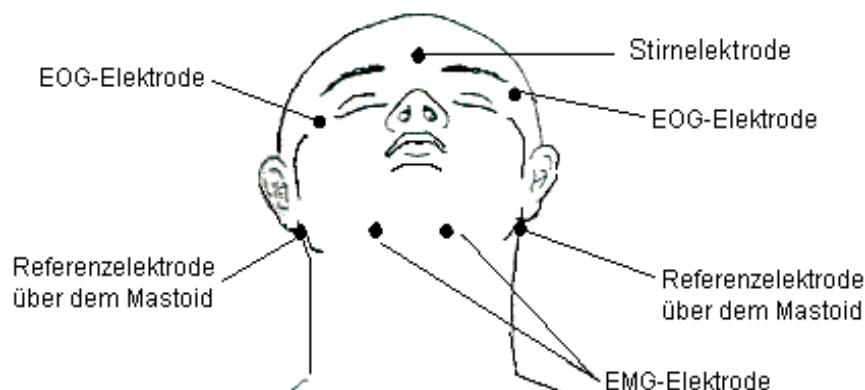


Abb. 3.4: Positionierung des sieben Haut-Elektroden nach [Wachter, 2005].

Die Grundlage für die Auswertung der Schlafstadien bildeten EEG-, EOG- und EMG-Signale, deren Ableitung nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales erfolgte [Rechtschaffen und Kales, 1968]. Dementsprechend waren die Kopfelektroden C3 und C4 jeweils gegen das auf der Gegenseite liegende (das kontralaterale) Mastoid als Referenz verschaltet. Die Ableitung des EOGs erfolgte gegen eine gemeinsame Mastoid-Referenz. Für

die Aufnahme des EMG-Signals waren die beiden unter dem Kinn angebrachten Elektroden bipolar gegeneinander verschaltet.

Wie bereits in der Erststudie wurde zu Forschungszwecken zusätzlich die Stirnelektrode als Referenzelektrode für die Kopfelektroden F3, F4, C3, C4, P3 und P4 verwendet, da das EEG-Signal bei der Verschaltung gegen die Mastoidelektrode häufig durch die Herzfrequenz oder das Schwitzen des Probanden gestört wird. Diese Art von Artefakten reduziert sich bei Verwendung der Stirnelektrode als Referenz.

3.6 Aufzeichnung der polysomnographischen Daten

Die analoge Aufzeichnung der Elektrodensignale erfolgte mit Hilfe eines geerdeten 21-Kanal-Polysomnographen. Der Frequenzbereich der Aufnahme war durch einen Hochpass- und einen Tiefpass-Filter auf den Bereich 0,3 Hz bis 70 Hz begrenzt. Ein zusätzlicher Notch-Filter bewirkte die Unterdrückung der Wechselstromfrequenz von 50 Hz. Die Empfindlichkeit des Polysomnographen betrug 7 $\mu\text{V}/\text{mm}$.

Die analogen Daten wurden mit Hilfe einer 12-Bit-A/D-Wandlerkarte eines PCs mit einer Frequenz von 600 Hz aufgezeichnet und digitalisiert.

Die gesamte Schlafaufzeichnung war in gleich lange Epochen aufgeteilt, wobei eine Epoche jeweils einem Blatt des EEG-Registrierpapier entsprach. Da Schlaf-EEGs in der Regel mit einem Papiervorschub von zehn oder 15 mm/s aufgezeichnet werden, kann eine Epoche je nach der gewählten Geschwindigkeit 20 oder 30 Sekunden dauern. In der Erst- und in der Folgestudie betrug die Epochendauer 30 Sekunden. Hierbei handelt es sich um die herkömmliche Epochendefinition, welche trotz der zunehmenden Verwendung von papierlosen Aufzeichnungs- und Auswertungsverfahren weiterhin gebräuchlich ist.

Die Abbildung 3.5 zeigt eine für diese Studie typische Epoche einer polysomnographischen Ableitung.

Die Ableitung besteht aus insgesamt 12 Kanälen. Die Kanäle 1 und 2 zeigen die EEG-Signale der Elektroden C3 und C4. In Kanal 3 und 4 ist das EOG abgebildet. Die rollenden Augenbewegungen in dieser Epoche sind gut zu erkennen. Kanal 5 zeigt das EMG, welches die Höhe des Muskeltonus misst. Mithilfe des EKGs in Kanal 6 wird die Herzfrequenz registriert. Anhand dieser sechs Kanäle erfolgt die Schlafstadienauswertung nach Rechtschaffen und Kales.

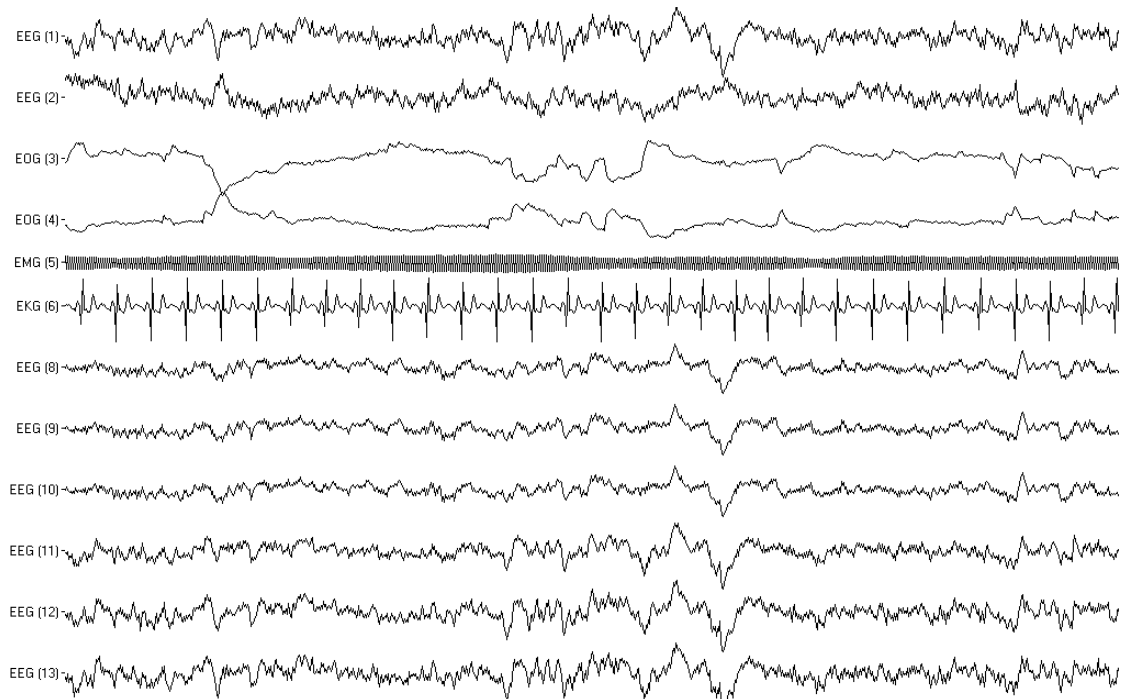


Abb. 3.5: Beispiel einer Epoche aus der Schlafableitung eines Probanden im REM-Schlaf.

Die Auswertung der Leistungsspektren basierte auf den Daten der Kanäle 8 bis 13, welche den Signalen der Kopfelektroden F3, F4, C3, C4, P3 und P4 entsprachen.

3.7 Auswertung

Diese Studie war als Doppelblind-Studie angelegt. Weder die Probanden, noch die Nachtwachen, noch die Auswertenden hatten Informationen darüber, ob eine Exposition durch das elektromagnetische Feld während der Nacht stattgefunden hatte oder nicht. Alle Befunde und Ergebnisse wurden unter Wahrung der Anonymität der Teilnehmer und unter Berücksichtigung des Bundesdatenschutzes dokumentiert. Die experimentellen Untersuchungen am Menschen in unserer Studie entsprachen den ethischen Anforderungen gemäß der Deklaration des Weltärztebundes von Helsinki/Tokio 1964/1975. Eine Genehmigung der Studie erfolgte durch die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

3.7.1 Schlafstadienauswertung

Die Schlafstadienauswertung nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [Rechtschaffen und Kales, 1968] beruhte auf dem Elektroenzephalogramm (EEG), dem Elektrookulogramm (EOG) und dem Elektromyogramm (EMG) (Kanal 1 bis 6, siehe Abschnitt 3.5). Jeder Epoche

der in dieser Studie untersuchten Nächte wurde ein Schlafstadium zugewiesen. Die Zuordnung erfolgte manuell durch einen doppelblinden Auswertenden. Epochen, die sich aufgrund von Artefakten (z.B. durch Bewegungen) nicht beurteilen ließen, fanden in der Auswertung keine Berücksichtigung. Eine graphische Darstellung des Schlafprofils, das sogenannte Hypnogramm, ist in Abb. 2.1 für einen der Probanden abgebildet.

3.7.2 Auswertung der Leistungsspektren

In Abhängigkeit von der klassischen Schlafstadienanalyse wurde die Aktivität ausgewählter Hirnareale anhand der Signale der Kopfelektroden F3, F4, C3, C4, P3 und P4 analysiert. Für jede Epoche eines Schlafstadiums wurde das Leistungsspektrum der Kanäle 8 bis 13 mit Hilfe der Fourier-Transformation berechnet (siehe Abschnitt 2.3 und 2.4). Als Filter kam ein Hanning-Fenster von 30 Sekunden zum Einsatz.

Für jedes einzelne Schlafstadium wurde für jeden Kanal ein gemittelttes Leistungsspektrum erstellt. Diese entstanden aus der Mittelung der Leistungsspektren aller Epochen eines Schlafstadiums einer Nacht innerhalb des jeweiligen Kanals (Abbildung 3.6).

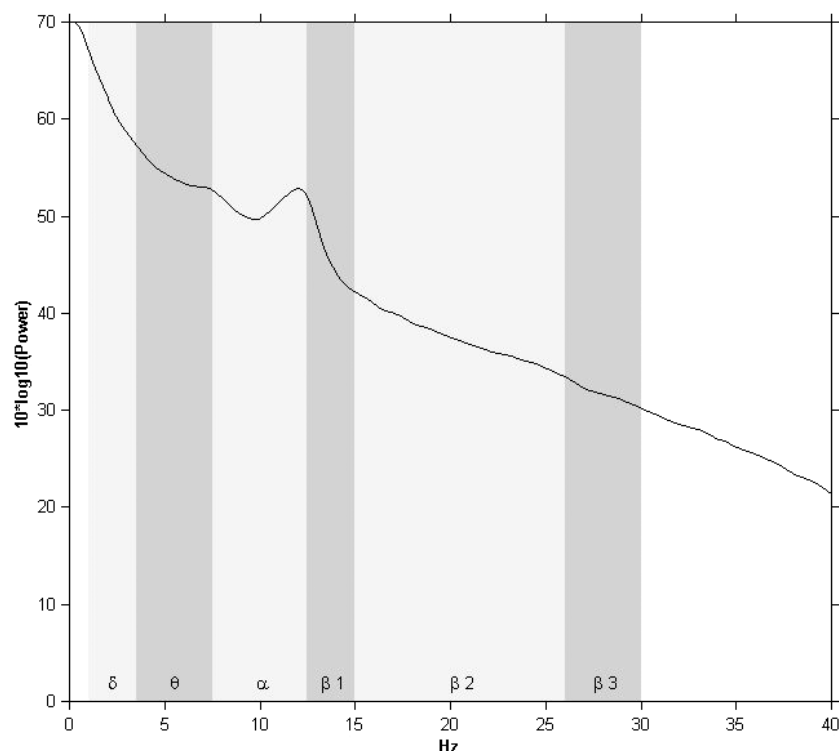


Abb. 3.6: Über alle REM-Schlaf-Epochen einer Nacht gemittelttes Leistungsspektrum.

Eine Ausnahme bildet die Überprüfung der Hypothese D. Die Mittelung erfolgte über alle Epochen eines Schlafstadiums eines Schlafzyklus. Im Folgenden werden die gemittelten Leistungsspektren kurz als Leistungsspektren bezeichnet.

3.7.3 Statistische Auswertung

Die Leistungsdifferenzen in den einzelnen Schlafstadien wurden zwischen verschiedenen Nächten innerhalb der Untersuchungsgruppen einerseits und zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe andererseits berechnet.

Der statistische Vergleich der Leistungsspektren einzelner Nächte innerhalb der Untersuchungsgruppen erfolgte durch die Anwendung des nichtparametrisch, verbundenen Wilcoxon-Tests. Zur Bewertung des Unterschiedes der Leistungsspektren zwischen den beiden Probandengruppen dagegen wurden die p-Werte durch den U-Test nach Mann-Whitney für nichtparametrische, rangskalierte, unabhängige Stichproben berechnet.

Jeder Frequenz im Bereich zwischen 0 Hz und 40 Hz wurde mit Hilfe der beiden oben genannten Testverfahren eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet und in Form eines Balkendiagramms graphisch dargestellt. Als signifikant wurde $p \leq 0,05$ angenommen. Die Analyse erfolgte mit der SPSS Statistik Software für Windows (Version 8.0.2).

3.7.4 Kriterien für signifikante Leistungsunterschiede

Spektrale Veränderungen in den einzelnen Schlafstadien lassen sich durch die Differenzen der Leistungsspektren der zu untersuchenden Nacht zu denen der Referenznacht charakterisieren. Die Referenznacht bildete die sogenannte Baseline. Jeder Frequenz wurde mit Hilfe eines paarweisen Wilcoxon-Tests eine Wahrscheinlichkeit (der sogenannte p-Wert) zugeordnet (siehe Abschnitt 3.7.3). Eine hohe Amplitude in der Leistungsdifferenz (Differenz ≥ 2) gepaart mit einem niedrigen p-Wert ($\leq 0,05$) über einen Frequenzbereich von mindestens 2,5 Hz definierte eine bedeutsame Leistungsveränderung. Damit war eine Unterscheidung zwischen signifikanten und nicht signifikanten Veränderungen möglich.

Das Kriterium für die Leistungsdifferenz (Differenz ≥ 2) wurde in Übereinstimmung mit dem in [Fritzer et al., 2007] gewählt. Es unterschied sich von dem der Basisstudie, in der eine Differenz ≥ 1 als signifikant galt [Wachter, 2005]. Die Festlegung des Kriteriums orientierte sich an der Abbildung 3.7, in der die Leistungsdifferenzen in Form eines Histogramms aufgetragen sind. Deutlich zu erkennen ist, dass eine Leistungsdifferenz von 1 zu den am häufigsten vorkommenden Werten zählte und somit als Schwellenwert ungeeignet war. Stuft man jedoch die Leistungsdifferenz ≥ 2 als signifikant ein, führt dies zu einem aussagefähigen

Kriterium, da 73,5 % der Leistungsdifferenzen < 2 und nur 26,5 % ≥ 2 waren.

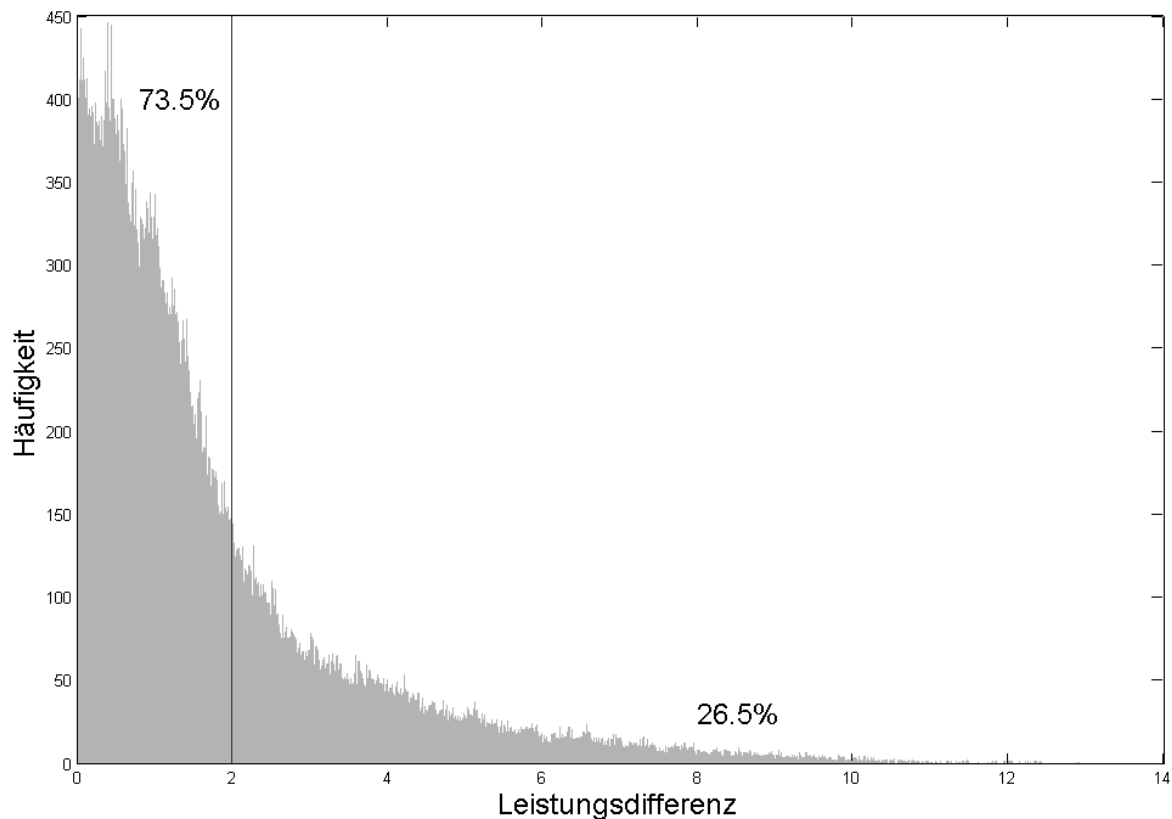


Abb. 3.7: Häufigkeit der Vorkommen der Leistungsdifferenzen. Analysiert wurden 570475 Leistungsdifferenzen. Ihr Mittelwert betrug 1,63 bei einer Standardabweichung von 1,67. 73,5 % der Leistungsdifferenzen war kleiner als 2, 26,5 % lagen darüber.

Abbildung 3.8 zeigt eine Zunahme der spektralen Leistung in allen Frequenzbereichen der REM-Schlafphase. Betrachtet wurde die Nacht H im Vergleich zu der Referenznacht B. Allerdings sind nur die Veränderungen in dem Frequenzbereich 12,8 – 15,6 Hz statistisch signifikant.

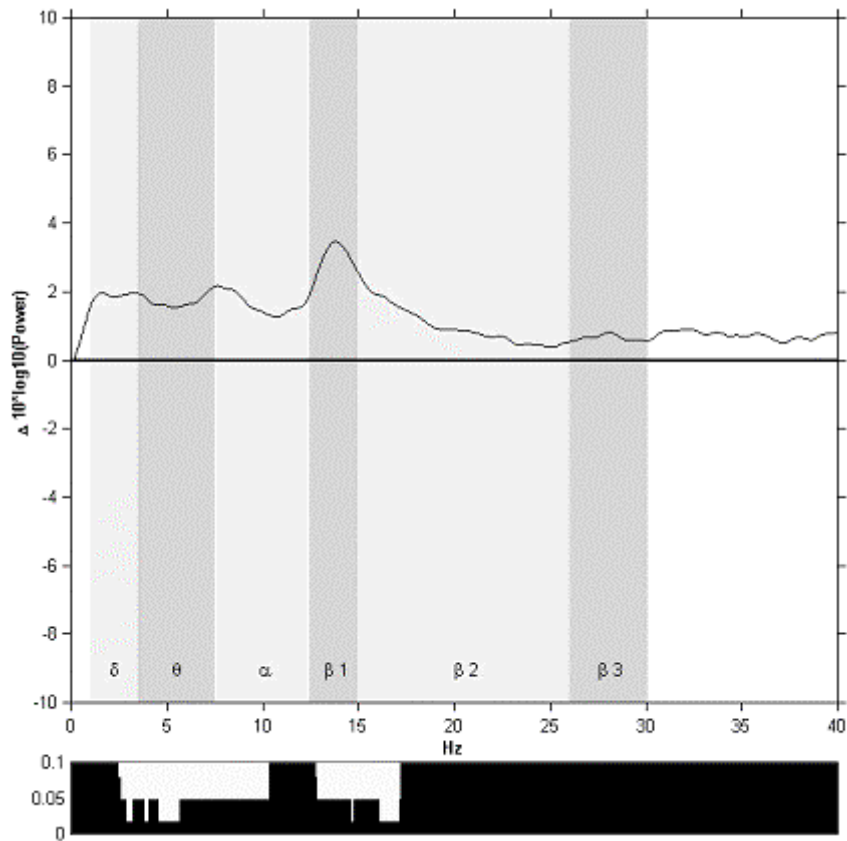


Abb. 3.8: Leistungsspektrum und p-Werte der Ableitnacht H (REM-Schlafphase) des Kanals C3 aus der Probandengruppe C mit 14 Nächten ohne Exposition durch das elektromagnetische Feld. Als Baseline diente die Referenznacht B.

4. Ergebnisse

Für jedes Schlafstadium und für jede einzelne Elektrodenposition wurden rechnergestützt Leistungsspektren aus den polysomnographisch abgeleiteten EEG-Daten ermittelt. Die pro Schlafstadium und Elektrodenposition über alle Epochen gemittelten Spektren (vergleiche Abschnitt 3.7.2) bildeten den Ausgangspunkt für alle weiteren Untersuchungen und werden im Folgenden kurz als Leistungsspektren bezeichnet.

Abweichungen der Leistung (engl.: power) in den einzelnen Schlafstadien lassen Rückschlüsse auf das Schlafverhalten zu [Wachter, 2005]. Die Analyse der Leistungsunterschiede erfolgte in dem Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 40 Hz. Wie in der Erststudie beschränkte sich die Analyse auf die folgenden Frequenzbänder: Delta-Band (1 – 3,5 Hz), Theta-Band (3,5 – 7,5 Hz), Alpha-Band (7,5 – 12,5 Hz) und Beta-Band (12,5 – 15 Hz). Frequenzen oberhalb von 15 Hz wurden dem Beta-Band zugeordnet. Aufgrund großer intraindividuelle Schwankungen ist das Beta-Band für die Schlafforschung von eher untergeordneter Bedeutung.

4.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Leistungsdifferenzen in den einzelnen Schlafstadien wurden in Abhängigkeit von der jeweiligen Hypothese untersucht. Um zufällige Abweichungen der Leistungsspektren von solchen unterscheiden zu können, die auf einen kausalen Zusammenhang zurückzuführen sind, wurden die folgenden Kriterien festgelegt (siehe Abschnitt 3.7.4). Eine Differenz gilt als wesentlich, wenn sie über einen Frequenzbereich von mindestens 2,5 Hz im Leistungsspektrum statistisch signifikant ist ($p\text{-Wert} \leq 0,05$) und gleichzeitig eine Leistungsdifferenz ≥ 2 aufweist. Somit wurden in dieser Arbeit bei der Auswertung der Leistungsdifferenzen die gleichen Kriterien zu Grunde gelegt wie in [Fritzer et al., 2007].

Die Abweichungen der Leistung von der Baseline (vergleiche Abschnitt 3.7) sind vollständig in Tabellenform zusammengefasst und befinden sich in den Unterkapiteln zu den einzelnen Hypothesen. Eine Zunahme der spektralen Leistung im Vergleich zur Referenzkurve ist durch das Symbol \uparrow gekennzeichnet, eine Leistungsabnahme durch \downarrow .

Zur Veranschaulichung werden einzelne, signifikante Ergebnisse zusätzlich in graphischer Form dargestellt. Hierbei entspricht die Baseline der Nulllinie der Leistungsdifferenzen.

Zudem sind in den Grafiken die p-Werte zwischen 0 Hz und 40 Hz in Form eines Balkendiagrammes aufgetragen. Die p-Werte ergaben sich durch Anwendung des Wilcoxon-Tests bzw. des U-Tests nach Mann-Whitney (siehe Abschnitt 3.7.3) auf die Unterschiede in der Leistung.

4.2 Hypothese A: Leistungsspektren der vorletzten Nacht G der Basisstudie

In der Basisstudie wurde der Schlaf von insgesamt 20 Probanden über jeweils acht Nächte untersucht. Zehn Testpersonen waren ab der dritten Nacht (Nacht C) dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, zehn weitere Probanden dienten als Kontrollgruppe und schliefen alle acht Nächte ohne Exposition. In der Erststudie wurden die Nächte B, C und H spektralanalytisch ausgewertet. Wachter beobachtete sowohl in der Expositions- als auch in der Kontrollgruppe nach sechs Nächten (in der Nacht H) eine signifikante Leistungsabnahme im Delta-Frequenzband im Schlafstadium III [Wachter, 2005]. Weitaus stärker war dies bei der Kontrollgruppe ausgeprägt, bei der sich zusätzlich eine Leistungszunahme im Alpha-Frequenzband des REM-Schlafes zeigte. Um beurteilen zu können, ob es sich hierbei um einen Langzeiteffekt handelt, wurden in dieser Arbeit aus den im Zuge der Erststudie aufgenommenen Daten die Leistungsspektren der vorletzten Ableitnacht (Nacht G) bestimmt und mit denen der Nacht B verglichen.

Die spektralanalytische Auswertung der Nacht G im Vergleich zu der Referenznacht B ergab weder in der Kontroll- noch in der Expositionsgruppe statistisch relevante Veränderungen in den Schlafstadien II, III und IV (Tabellen 4.1 und 4.2).

Im REM-Schlaf der Kontrollgruppe war an allen Ableitpositionen eine Abnahme der Leistung von ca. 0 – 15,5 Hz, d.h. sowohl im Delta-, im Theta-, im Alpha- als auch im Beta-Band, zu erkennen. Allerdings war dieser Leistungsabfall nur an zwei Elektroden (F3 und F4) durchgängig als signifikant zu bewerten (Tabelle 4.1).

Ein ähnlicher Leistungsabfall war im REM-Schlaf der Expositionsgruppe zu beobachten. An den Ableitpositionen F4, C4, P3 und P4 nahm die spektrale Leistung im Delta-Band ab. Des Weiteren verringerte sich die Leistung im Alpha- und Beta-Band an allen Ableitpositionen mit Ausnahme der Elektrode C3. Zudem trat an den Positionen F3 und F4 eine Abnahme im Theta-Band auf. Im Delta-Band an den Ableitpositionen C3 und F3, im Theta-Band an C3, C4, P3 und P4, im Alpha-Band an C3 und im Beta-Band an C3 zeigten sich ebenfalls Leistungsabfälle. Diese waren jedoch nicht signifikant.

Ableitposition	Schlafstadium			
	II ^{9P}	III ^{9P}	IV ^{4P}	REM ^{9P}
C3	∅	∅	∅	0,0 – 4,7 Hz: ↓ 9,9 – 15,5 Hz: ↓
C4	∅	∅	∅	0,2 – 8,4 Hz: ↓ 9,5 – 15,4 Hz: ↓
P3	∅	∅	∅	0,0 – 4,7 Hz: ↓ 10,8 – 15,0 Hz: ↓
P4	∅	∅	∅	0,2 – 4,9 Hz: ↓ 10,5 – 15,0 Hz: ↓
F3	∅	∅	∅	0,6 – 14,9 Hz: ↓
F4	∅	∅	∅	0,6 – 15,2 Hz: ↓

Tab. 4.1: Signifikante Leistungsunterschiede in der Nacht G der Kontrollgruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie). Die Schlafstadien II, III, REM waren nur für 9 Probanden, das Schlafstadium IV nur für 4 Testpersonen auswertbar.

Ableitposition	Schlafstadium			
	II	III	IV ^{4P}	REM ^{9P}
C3	∅	∅	∅	∅
C4	∅	∅	∅	0,0 – 4,2 Hz: ↓ 10,5 – 15,1 Hz: ↓
P3	∅	∅	∅	0,0 – 3,0 Hz: ↓ 11,8 – 14,9 Hz: ↓
P4	∅	∅	∅	0,0 – 3,3 Hz: ↓ 11,7 – 14,9 Hz: ↓
F3	∅	∅	∅	6,1 – 14,8 Hz: ↓
F4	∅	∅	∅	0,7 – 5,1 Hz: ↓ 5,4 – 14,9 Hz: ↓

Tab. 4.2: Signifikante Leistungsunterschiede in der Nacht G der Expositionsgruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie). Das Schlafstadium REM war nur für 9 Probanden, das Schlafstadium IV nur für 4 Testpersonen auswertbar.

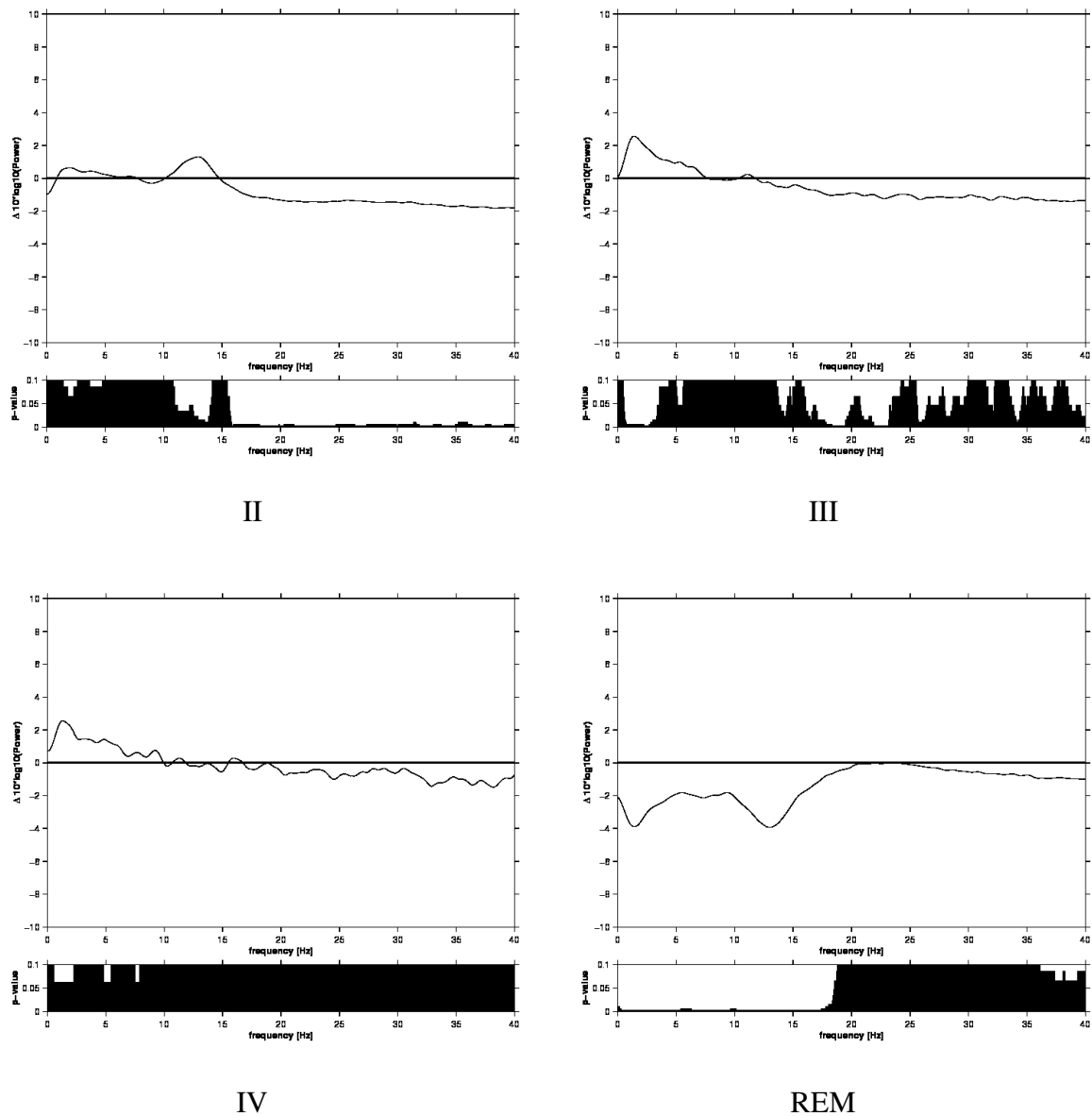


Abb. 4.1: Leistungsdifferenzen und p-Werte der Nächte G bezogen auf die Referenznacht B an der Ableitposition F4 der Kontrollgruppe, geordnet nach den Schlafstadien II, III, IV und REM (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie).

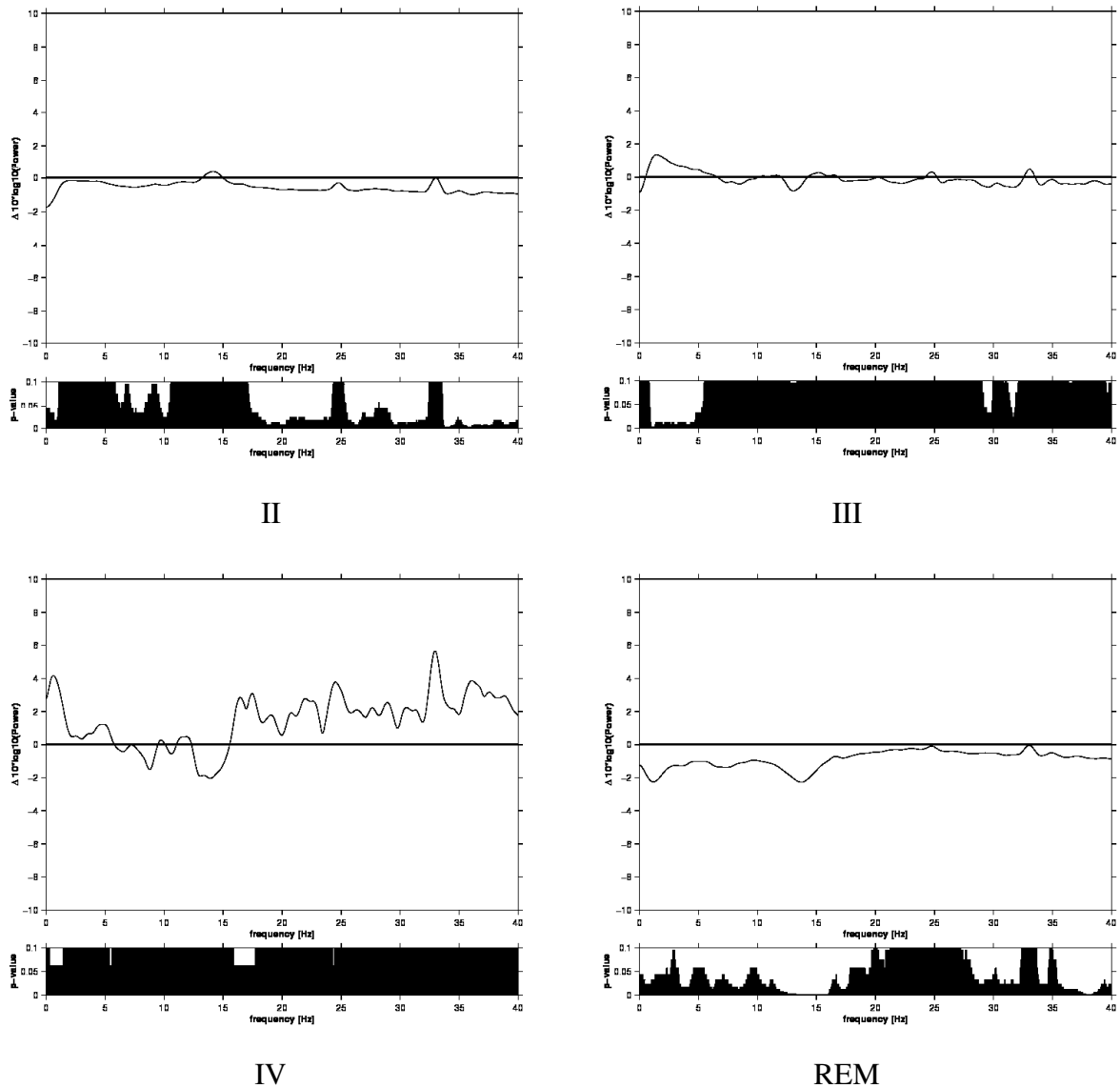


Abb. 4.2: Leistungsdifferenzen und p-Werte der Nächte G bezogen auf die Referenznacht B an der Ableitposition F4 der Expositionsgruppe, geordnet nach den Schlafstadien II, III, IV und REM (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie).

4.3 Hypothese B: Leistungsspektren der Nächte B, C und H der Probandengruppe B (ohne Exposition)

Zur Überprüfung der Hypothese B, dass die Anzahl der Testpersonen zu gering war und die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt wurde, schliefen sechs Probanden acht Nächte ohne Exposition durch das elektromagnetische Feld. Darunter befanden sich vier Testpersonen aus der Expositionsgruppe der Basisstudie, die erneut an dieser Studie teilnahmen. Hierdurch konnte ein Cross-Over-Design teilrealisiert werden. Wie in der Erststudie wurde die spektrale Leistung der Nächte C und H bezogen auf die der Nacht B analysiert.

Im Vergleich zur Referenznacht B zeigten sich weder in den Schlafstadien II und III, noch im REM- Schlaf der Nacht C relevanten Veränderungen (Tabelle 4.3).

Auch in der Nacht H traten in den Schlafstadien II, III und REM keine signifikanten Leistungsdifferenzen auf (Tabelle 4.4).

Eine wissenschaftlich fundierte, spektralanalytische Auswertung des Schlafstadiums IV war aufgrund der zu geringen Anzahl verwertbarer Epochen nicht möglich.

Ableitposition	Schlafstadium		
	II	III	REM
C3	∅	∅	∅
C4	∅	∅	∅
P3	∅	∅	∅
P4	∅	∅	∅
F3	∅	∅	∅
F4	∅	∅	∅

Tab. 4.3: Korrelation der Leistungsunterschiede in der Nacht C der scheinexponierten Gruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 8 Nächte dieser Folgestudie).

Ableitposition	Schlafstadium		
	II	III ^{4P}	REM
C3	Ø	Ø	Ø
C4	Ø	Ø	Ø
P3	Ø	Ø	Ø
P4	Ø	Ø	Ø
F3	Ø	Ø	Ø
F4	Ø	Ø	Ø

Tab. 4.4: Korrelation der Leistungsunterschiede in der Nacht H der scheinexponierten Gruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 8 Nächte dieser Folgestudie). Das Schlafstadium III war nur für 4 Probanden auswertbar.

4.4 Hypothese C: Leistungsspektren der Nächte B, C, H und N der Probandengruppe C (ohne Exposition)

Für die Bewertung der Hypothese C, dass bei einer Langzeituntersuchung die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf hat, verbrachten sechs Probanden anstelle von acht Nächten 14 Nächte in Folge im Schlaflabor ohne Exposition durch das elektromagnetische Feld. Die Nächte C, H und N bezogen auf die Nacht B wurden spektralanalytisch betrachtet.

Die Auswertung der Leistungsspektren der Nacht C unter Scheinexposition ergab, dass in den Schlafstadien II, III, IV und REM keine bedeutsamen Unterschiede in Bezug auf die Referenznacht B bestanden (Tabelle 4.5).

In den Schlafstadien II, III und IV der Nacht H zeigten sich ebenfalls keinerlei relevante Veränderungen in den Leistungsspektren (Tabelle 4.6). Im REM-Schlaf ließ sich an allen Ableitpositionen ein Anstieg der Leistung in den Bereichen zwischen 0 Hz und 9 Hz sowie zwischen 12 Hz und 15 Hz beobachten. Allerdings war diese Leistungszunahme nur in einigen Fällen als signifikant zu bewerten. An der Ableitposition C3 war ein relevanter Anstieg der Leistung im Beta-Band im Frequenzbereich von 12,8 Hz bis 15,6 Hz nachweisbar. Eine signifikante Leistungszunahme zeigte sich an der Elektrode F3 im Bereich von 2,5 Hz bis 8,9 Hz sowie zwischen 12,6 Hz und 15,6 Hz. Auch an der Ableitposition F4 war ein Anstieg der Leistung zwischen 0,3 Hz und 9,5 Hz sowie im Bereich von 12,4 Hz bis 17,6 Hz zu erkennen.

In der Nacht N ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der Leistungsspektren in den Schlafstadien II, III und IV gegenüber der Referenznacht B (Tabelle 4.7). Im REM-Schlaf trat lediglich an der Ableitposition P4 eine relevante Leistungsabnahme im Frequenzbereich zwischen 21,9 Hz und 40,0 Hz auf. An den anderen Elektroden zeigten sich zwar auch Leistungsabfälle oberhalb von 22 Hz, allerdings verfehlten diese die Signifikanzkriterien deutlich.

Ableitposition	Schlafstadium			
	II	III	IV ^{2P}	REM
C3	∅	∅	∅	∅
C4	∅	∅	∅	∅
P3	∅	∅	∅	∅
P4	∅	∅	∅	∅
F3	∅	∅	∅	∅
F4	∅	∅	∅	∅

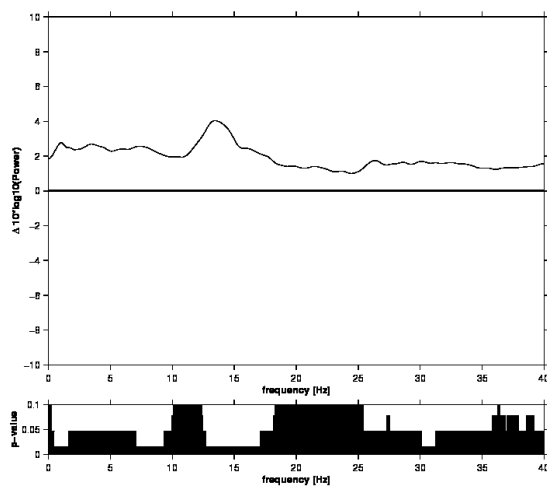
Tab. 4.5: Korrelation der Leistungsunterschiede in der Nacht C der scheinexponierten Gruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 14 Nächte dieser Folgestudie). Das Schlafstadium IV war nur für 2 Probanden auswertbar.

Ableitposition	Schlafstadium			
	II	III	IV ^{2P}	REM
C3	∅	∅	∅	12,8 – 15,6 Hz: ↑
C4	∅	∅	∅	∅
P3	∅	∅	∅	∅
P4	∅	∅	∅	∅
F3	∅	∅	∅	2,5 – 8,9 Hz: ↑ 12,6 – 15,6 Hz: ↑
F4	∅	∅	∅	0,3 – 9,5 Hz: ↑ 12,4 – 17,6 Hz: ↑

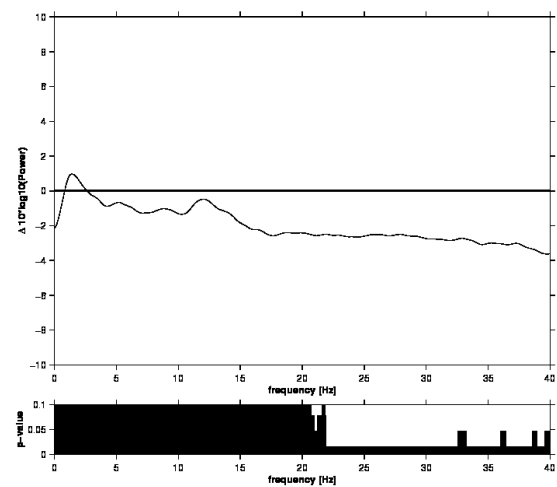
Tab. 4.6: Korrelation der Leistungsunterschiede in der Nacht H der scheinexponierten Gruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 14 Nächte dieser Folgestudie). Das Schlafstadium IV war nur für 2 Probanden auswertbar.

Ableitposition	Schlafstadium			
	II	III ^{5P}	IV ^{2P}	REM
C3	∅	∅	∅	∅
C4	∅	∅	∅	∅
P3	∅	∅	∅	∅
P4	∅	∅	∅	21,9 – 40,0 Hz: ↓
F3	∅	∅	∅	∅
F4	∅	∅	∅	∅

Tab. 4.7: Korrelation der Leistungsunterschiede in der Nacht N der scheinexponierten Gruppe im Vergleich zur Referenznacht B (Auswertung der 14 Nächte dieser Folgestudie). Das Schlafstadium III war nur für 5 Probanden, das Schlafstadium IV nur für 2 Testpersonen auswertbar.



H – B (F4)



N – B (P4)

Abb. 4.3: Exemplarische graphische Darstellung signifikanter Ergebnisse aus den Tabellen 4.6 und 4.7 im REM-Schlaf: Leistungsdifferenzen und p-Werte der Nacht H bezogen auf die Referenznacht B an der Ableitposition F4 der nicht exponierten Gruppe mit 14 Nächten (links) sowie der Nacht N im Vergleich zur Nacht B an der Position P4 in der gleichen Gruppe.

4.5 Hypothese D: Leistungsspektren der ersten zwei Schlafzyklen der Nächte B und C der Basisstudie

Die Borbély-Studie [Borbély et al., 1999] zeigte bei Exposition durch ein elektromagnetisches Feld eine erhöhte spektrale Leistung in den Frequenzbereichen von 10 Hz bis 11 Hz sowie zwischen 13,5 und 14 Hz in den ersten NonREM-Schlafphasen. Um zu überprüfen, inwieweit diese Ergebnisse anhand der Daten der Basisstudie reproduzierbar sind, wurden in dieser Arbeit die Leistungsspektren der ersten zwei Schlafzyklen der Nächte B und C der Basisstudie untersucht.

4.5.1 Zeitliche Entwicklung der Leistungsspektren zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe der Basisstudie der Nacht C

Bei der Nacht C der Basisstudie handelte es sich um die erste Nacht, in der die Hälfte der Probanden dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt waren. Für die zeitliche Entwicklung der Leistungsspektren zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe wurden die ersten beiden Schlafzyklen separat betrachtet. Die Leistungsunterschiede ergaben sich durch den Vergleich der Expositionsgruppe mit der Kontrollgruppe als Referenz.

Wie in Abschnitt 4.3 war eine wissenschaftlich fundierte, spektralanalytische Auswertung des Schlafstadiums IV aufgrund der zu geringen Anzahl verwertbarer Epochen nicht möglich.

Der Vergleich der Expositions- mit der Kontrollgruppe zeigte in den Schlafstadien II und III der ersten zwei Schlafzyklen keine statistisch signifikanten Veränderungen (Tabelle 4.8). Im REM-Schlaf des zweiten Zyklus ist ein Abfall der spektralen Leistung im Delta-Band (1,1 – 3,6 Hz) in der Expositionsgruppe zu beobachten. Die abnehmende Tendenz ist bereits im ersten Schlafzyklus erkennbar, jedoch nicht statistisch signifikant.

	Schlafstadium		
	II	III	REM
Zyklus 1	∅	∅	∅
Zyklus 2	∅	∅	1,1 – 3,6: ↓

Tab. 4.8: Korrelation der Leistungsunterschiede an der Ableitposition C3 in der Nacht C der Expositionsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe als Referenz in den ersten beiden Schlafzyklen (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie).

4.5.2 Zeitliche Entwicklung der Leistungsspektren zwischen den Nächten B und C der Expositionsgruppe der Basisstudie

Um eventuelle, von vornherein bestehende Unterschiede zwischen der Expositions- und der Kontrollgruppe aufzudecken, wurden zusätzlich zu 4.5.1 innerhalb der Expositionsgruppe die Leistungsspektren der ersten beiden Schlafzyklen der Nacht C mit denen der Nacht B als Referenz verglichen.

Die Auswertung der ersten zwei Schlafzyklen zwischen den Nächten B und C innerhalb der Expositionsgruppe (Tabelle 4.9) zeigt zwar verschiedene statistisch signifikante Frequenzbereiche ($p\text{-Wert} \leq 0,05$), jedoch sind bedingt durch die geringe Amplitudenhöhe (Powerdifferenz < 2) keine wesentlichen spektralen Auffälligkeiten in den Schlafstadien II und III sowie im REM-Schlaf zu erkennen.

	Schlafstadium		
	II	III	REM
Zyklus 1	∅	∅	∅
Zyklus 2	∅	∅	∅

Tab. 4.9: Korrelation der Leistungsunterschiede an der Ableitposition C3 in der Nacht C der Expositionsgruppe im Vergleich zur Referenznacht B in den ersten beiden Schlafzyklen (Auswertung der 8 Nächte der Basisstudie).

5. Diskussion

In dieser Arbeit wurden systematisch die Kurz- und Langzeitauswirkungen eines elektromagnetischen Hochfrequenzfeldes, wie es von einem eingeschalteten Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb ausgeht, auf den Schlaf gesunder männlicher Probanden erforscht. Es handelt sich um eine doppelblinde Folgestudie, die verschiedene, durch die Erststudie [Wachter, 2005] aufgeworfene Fragen beantworten sollte.

Wachter simulierte die Situation, dass ein eingeschaltetes Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb neben dem Kopfkissen des Schlafenden liegt. Der Kopf war hierbei einem gleichmäßigen elektromagnetischen Feld ausgesetzt. Die absorbierte Strahlungsleistung des verwendeten 900 MHz Pseudo-GSM-Testsignals lag unter 1 W / kg und somit unter dem vom Bundes-Immisionsschutzgesetz [BImSchV, 1996] festgelegten Höchstwert von 2 W / kg . Um den Einfluss äußerer elektromagnetischer Felder zu reduzieren, fand der Versuch in einer reflexionsarmen Kammer statt. Durch diesen Versuchsaufbau wurde eine realistische Situation nachgestellt, die unter definierten Bedingungen reproduzierbare Untersuchungen der Auswirkungen elektromagnetischer Felder von Mobiltelefonen auf den Schlaf ermöglichte.

Wachter teilte die 20 männlichen gesunden Probanden randomisiert in eine Expositions- und eine Kontrollgruppe auf, die jeweils acht aufeinander folgende Nächte in der reflexionsarmen Kammer verbrachten. Die Probanden der Kontrollgruppe schliefen alle acht Nächte ohne diese Exposition. Durch die Untersuchung sowohl der Expositions- als auch der Kontrollgruppe war es möglich, auftretende Unterschiede im Schlafmuster dem elektromagnetischen Feld zuzuordnen.

Es gibt Untersuchungen, die zeigen, dass sich der Schlaf im Verlauf mehrerer im Schlaflabor verbrachter Nächte verändert. So konnte Toussaint [Toussaint et al., 1997] nachweisen, dass bereits ein kleines Schlafdefizit aus der ersten Nacht Auswirkungen auf die zweite und dritte Nacht hat. Es ist daher in vielen Schlaflaboren gängige Praxis, dem Probanden eine Eingewöhnungsnacht zu gewähren. In der Basisstudie von Wachter [Wachter, 2005] war die Expositionsgruppe daher erst nach der Adaptationsnacht und einer weiteren Referenznacht für die restlichen sechs Nächte doppelblind dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt.

Die EEG-Daten waren in Intervalle der Länge von 30 s unterteilt. Diesen sogenannten Epochen wurden nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [Rechtschaffen und Kales, 1968] die verschiedenen Schlafstadien zugeordnet. Die für jede Epoche berechneten Leistungsspektren wurden für jede der sechs Ableitpositionen am Kopf über alle

Schlafstadien gemittelt. Bedeutsame Unterschiede zwischen dem Schlaf zweier Nächte waren anhand der Differenzen dieser mittleren Leistungsspektren definiert. Als signifikant galten Leistungsdifferenzen ≥ 1 über einen Bereich von 1 Hz mit einem p-Wert $\leq 0,05$. Der p-Wert ergab sich durch Anwendung des Wilcoxon-Tests bzw. des U-Tests nach Mann-Whitney auf die Leistungsunterschiede.

Wachter beobachtete, dass in der letzten Nacht (Nacht H) der Kontrollgruppe im Schlafstadium III im Vergleich zu der zweiten Nacht (Nacht B) eine deutliche Abnahme der spektralen Leistung im Delta-Band (0 – 3,5 Hz) stattfand ([Wachter, 2005]). Außerdem zeigte sich im REM-Schlaf der Nacht H der Kontrollgruppe eine Leistungssteigerung in allen analysierten Frequenzbändern (0 – 40 Hz), wobei der Anstieg besonders ausgeprägt im Alpha-Band im Bereich von 10 Hz war.

Wachter interpretierte dies unter Bezugnahme auf früher veröffentlichten Schlafentzugsstudien so, dass in der Expositionsgruppe in der achten Nacht noch ein Erholungsbedarf von einem durch die Adaptationsnacht bedingten Schlafdefizit bestand, während in der Kontrollgruppe in der Nacht H eine Normalisierung eingetreten war [Wachter, 2005]. Als Fazit zog Wachter, dass ein eingeschaltetes Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb neben dem Kopfkissen keine Schlafstörung an sich produziert, aber die natürliche Erholung von anderweitig bedingten Schlafstörungen verhindert oder verlangsamt.

Wenn die Theorie von Wachter stimmt, dann muss der beschriebene Effekt bereits in den der Nacht H vorausgegangenen Nächten zu beobachten gewesen sein, wenn auch möglicherweise in abgeschwächter Form. Hieraus entwickelte sich die **Hypothese A** dieser Folgestudie: Der in der Kontrollgruppe der Basisstudie gemessene Langzeiteffekt ist ein tatsächlicher Einfluss der elektromagnetischen Strahlung, welcher sich kontinuierlich mit zunehmender Anzahl der Ableitnächte immer deutlicher manifestiert.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde in dieser Arbeit die vorletzte Ableitnacht (Nacht G) aus dem Datenbestand der Basisstudie mit der zweiten Nacht (Nacht B) als Referenz im Rahmen einer spektralanalytischen Auswertung verglichen. Als signifikant galten in dieser Studie Leistungsdifferenzen ≥ 2 über einen Bereich von 2,5 Hz mit einem p-Wert $\leq 0,05$. Diese Signifikanzkriterien unterschieden sich von denen in der Basisstudie. Sie wurden in Übereinstimmung mit denen in [Fritzer et al., 2007] gewählt, da die Untersuchungen gezeigt haben, dass eine Leistungsdifferenz von 1 zu den am häufigsten vorkommenden Differenzen zählte und somit als Schwellenwert ungeeignet war.

Weder in der Kontroll- noch in der Expositionsgruppe ließen sich statistisch signifikante Veränderungen in den Schlafstadien II, III und IV nachweisen. Im REM-Schlaf der Kontrollgruppe war an allen Ableitpositionen eine Abnahme der Leistung von 0 – 15,5 Hz, d.h. sowohl im Delta-, im Theta-, im Alpha- als auch im Beta-Band, zu erkennen. Allerdings war dieser Leistungsabfall nur an zwei Elektroden (F3 und F4) durchgängig als signifikant zu bewerten. Ein vergleichbarer Leistungsabfall war in der Expositionsgruppe im REM-Schlaf zu beobachten.

Da die Leistung im REM-Schlaf sowohl in der Expositions- als auch in der Kontrollgruppe über alle Frequenzbereiche abfiel, kann ein Effekt durch das elektromagnetische Feld ausgeschlossen werden. Sowohl Wachter [Wachter, 2005] als auch Fritzer et al. [Fritzer et al., 2007] arbeiteten beide mit den gleichen Datensätzen und werteten die Nächte C und H in Bezug auf die Referenznacht B aus. Weder Wachter noch Fritzer beobachteten einen derartigen Leistungsabfall, weshalb die Leistungsabnahme in der Nacht G auf zufällige spektrale Schwankungen hindeutet, auch wenn der Bereich mit 15,5 Hz recht groß erscheint.

Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich der prognostizierte Langzeiteffekt nicht bestätigen. Es zeigten sich unterschiedliche Effekte zwischen einer, fünf und sechs Nächten mit einer Exposition durch das elektromagnetische Feld, aber es ergaben sich keine Hinweise auf kumulative Effekte. Das Ergebnis der spektralanalytischen Auswertung der vorletzten Nacht (Nacht G) spricht daher für zufällige spektrale Schwankungen, die das veränderte Spektrum in der letzten Nacht H der Kontrollgruppe der Basisstudie bedingten.

Wie anfangs beschrieben ist bei diesen Resultaten zu berücksichtigen, dass sich die Signifikanzkriterien der Basisstudie von Wachter und dieser Studie unterschieden. Da 53,8 % der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Leistungsdifferenzen größer als 1 waren, ist zu vermuten, dass die in [Wachter, 2005] gewählte Bedingung „Leistungsdifferenz ≥ 1 “ zu niedrig angesetzt war. Möglicherweise sind daher Ergebnisse der Basisstudie lediglich ein Produkt dieses Signifikanzkriteriums.

Es ist auch denkbar, dass die Ergebnisse von Wachter darauf zurückzuführen sind, dass die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt war. In der Basisstudie schliefen 10 Probanden acht aufeinander folgende Nächte ohne Exposition und dienten als Kontrollgruppe, 10 weitere Probanden schliefen ab der dritten Nacht (Nacht C) mit Exposition. Als zu untersuchende **Hypothese B** für diese Folgestudie ergab sich daraus die Theorie: Die Anzahl der Probanden war zu gering, weshalb die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt werden konnte.

In dieser Studie schliefen erneut sechs Probanden acht Nächte in Folge ohne Exposition durch das elektromagnetische Feld. Vier dieser Testpersonen nahmen zuvor in der Expositionsgruppe der Basisstudie teil. Hiermit konnte ein Cross-Over-Design teilrealisiert werden. Wie in der Studie von Wachter wurden die Leistungsdifferenzen der Nächte C und H im Vergleich zu der Referenznacht B untersucht.

In beiden Nächten ließen sich nach der statistischen Auswertung weder im NonREM-Schlaf noch im REM-Schlaf signifikante Veränderungen in Bezug auf die Nacht B feststellen. Wachter hingegen beobachtete in der Nacht H der Kontrollgruppe eine deutliche Abnahme der spektralen Leistung im Delta-Band des Schlafstadiums III sowie eine Leistungssteigerung im REM-Schlaf zwischen 0 Hz und 40 Hz. Diese unterschiedlichen Ergebnisse legen nahe, dass die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt war. Allerdings stellten Fritzer et al. [Fritzer et al., 2007] in ihrer auf dem gleichen Datenmaterial wie Wachters basierender Studie ebenfalls keine signifikanten Veränderungen zwischen den Nächten H und B sowie den Nächten C und B fest. Sie verwendeten die gleichen Unterscheidungsmerkmale wie in dieser Studie. Folglich ist davon auszugehen, dass der in [Wachter, 2005] beobachtete Effekt auf möglicherweise ungünstig gewählten Signifikanzkriterien beruhte und die Annahme identischer Gruppen tatsächlich gegeben war.

Wie bereits geschildert, zeigte die Basisstudie von Wachter ein verändertes Spektrum in der achten Nacht H. Neben der Hypothese A lässt diese Beobachtung auch die **Hypothese C** zu: Nach einer Langzeituntersuchung hat die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf.

Für die Untersuchung dieser Hypothese schliefen in dieser Folgestudie sechs Probanden anstelle von acht Nächten 14 Nächte in Folge unter den gleichen Bedingungen wie die Kontrollgruppe der Basisstudie, d.h. ohne Exposition durch das elektromagnetischen Feld. Dadurch war ein möglicher Langzeiteffekt des elektromagnetischen Feldes von vornherein ausgeschlossen. Erstmals wurde auf diese Weise der Schlaf gesunder Probanden länger als in acht aufeinander folgenden Nächten untersucht. Wie in der Basisstudie wurden die dritte Nacht C und die achte Nacht H bezogen auf die zweite Nacht B spektralanalytisch ausgewertet. Das besondere Interesse galt dem zusätzlich durchgeführten Vergleich der Leistungsspektren der letzten Ableitnacht N mit denen der Nacht B.

Bei der Auswertung der Nacht C waren weder im NonREM-Schlaf noch im REM-Schlaf signifikante Unterschiede in Bezug auf die Referenznacht B zu erkennen.

In den Schlafstadien II, III und IV der Nacht H zeigten sich ebenfalls keine relevanten Veränderungen zu der Nacht B in den Leistungsspektren. Im REM-Schlaf der Nacht H ließ sich an allen Ableitpositionen ein Anstieg der Leistung in den Bereichen zwischen 0 Hz und 9 Hz sowie zwischen 12 Hz und 15 Hz beobachten. Allerdings war diese Leistungszunahme nur an drei Elektroden (C3, F3 und F4) als signifikant zu bewerten.

Auch in den Schlafstadien II, III und IV der Nacht N waren keinerlei relevanten Leistungsunterschiede zu der Nacht B festzustellen. Im REM-Schlaf der Nacht N trat lediglich an der Ableitposition P4 eine signifikante Leistungsabnahme im Frequenzbereich zwischen 21,9 Hz und 40,0 Hz auf. An den anderen Elektroden zeigten sich zwar auch Leistungsabfälle oberhalb von 22 Hz, allerdings verfehlten diese die Signifikanzkriterien deutlich.

Die Auswertung der Nächten C, H und N zeigte in der Nacht C keine und in den Nächten H und N unterschiedliche signifikante Leistungsunterschiede. Es ergaben sich jedoch keine Hinweise auf kumulative Effekte. Die Resultate der spektralanalytischen Auswertung deuten daher auf zufällige spektrale Schwankungen hin. Insbesondere konnten die Ergebnisse der Nacht H in der Basisstudie nicht reproduziert werden. Die letzte Ableitnacht scheint keinen besonderen Einfluss auf den Schlaf zu haben.

Neben dieser Studie existieren nur die Arbeiten von Wachter [Wachter, 2005] und Fritzer et al. [Fritzer et al., 2007], die sich mit den Langzeitauswirkungen eines elektromagnetischen Hochfrequenzfeldes befasst haben. Es gibt allerdings einige wenige Untersuchungen, welche potentielle durch GSM-Mobiltelefon-Signale ausgelöste Kurzzeiteffekte im Schlafverhalten erforschten. Beispielsweise exponierten Mann und Röschke [Mann und Röschke, 1996] 14 Männer nach einer Adaptationsnacht während zweier Nächte, wobei das elektromagnetische Feld randomisiert ein- bzw. ausgeschaltet war. Sie beobachteten eine signifikante Leistungszunahme im Alpha-Frequenzbereich des REM-Schlafs. Zudem trat eine reduzierte Einschlaf-Latenz sowie eine verringerte REM-Dauer auf. Methodische Mängel bezüglich der Homogenität des elektromagnetischen Feldes führten zu zwei weiteren Studien der Arbeitsgruppe. Die Untersuchungen zum Kurzzeiteffekt unter kontrollierten Bedingungen durch Wagner et al. ([Wagner et al., 1998], [Wagner et al., 2000]) lieferten keine signifikanten Resultate. Dies stimmt sowohl mit den Ergebnissen von Wachter ([Wachter, 2005]) als auch mit denen von Fritzer et al. ([Fritzer et al., 2007]) überein.

Die Borbély-Studie [Borbély et al., 1999] untersuchte die Auswirkungen eines viertelstündlich abwechselnd ein- bzw. ausgeschalteten elektromagnetischen Feldes auf

einzelne Schlafzyklen. Sie beobachteten eine signifikante Verkürzung der Wachzeiten und fanden eine unter der Exposition in den ersten NonREM-Schlafphasen erhöhte spektrale Leistung im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 11 Hz sowie im Bereich von 13,5 Hz und 14 Hz. Ähnliche Resultate erzielten Loughran et al. [Loughran et al., 2005]. Sie stellten Veränderungen im Schlaf-EEG der ersten NonREM-Schlafphase fest. Im Wach-EEG fanden D'Costa et al. [D'Costa et al., 2003] während fünfminütiger Expositionsintervalle signifikante Unterschiede im Alpha-Band (8 – 13 Hz) und im Beta-Band (13 – 32 Hz).

Eine mögliche Erklärung für die beobachteten Auswirkungen ist, dass das auf das Gehirn einwirkende elektromagnetische Feld einen kurzzeitigen Effekt im zentralen Nervensystem auslöst, welcher nur wenige Minuten oder Stunden andauert und messbar ist. Im Verlauf der Nacht tritt eine Gewöhnung an diese Exposition auf, sodass zu einem späteren Zeitpunkt und auch in darauffolgenden Nächten mit wiederholter Exposition kein weiterer Einfluss durch das elektromagnetische Feld festzustellen ist.

Möglicherweise waren derartige Kurzeffekte wie in der Borbély-Studie auch in dem in dieser Studie verwendeten Datenmaterial zu beobachten. Daraus ergab sich die **Hypothese D** dieser Studie: Die Resultate der Borbély-Studie sind mit den vorliegenden Daten annäherungsweise zu reproduzieren.

Zur Verifikation der Borbély-Ergebnisse wurden in dieser Arbeit die ersten beiden Schlafzyklen der Nacht C aus dem Datenbestand der Kontroll- und der Expositionsgruppe der Basisstudie spektralanalytisch ausgewertet.

Der Vergleich der Expositions- mit der Kontrollgruppe innerhalb der ersten zwei Schlafzyklen zeigte in den Schlafstadien II und III keine statistisch signifikanten Veränderungen. Im REM-Schlaf des zweiten Zyklus war ein Abfall der spektralen Leistung im Delta-Band (1,1 – 3,6 Hz) in der Expositionsgruppe zu beobachten. Die abnehmende Tendenz war bereits im ersten Schlafzyklus erkennbar, jedoch nicht statistisch signifikant.

Zusätzlich wurden aus den bereits vorhandenen Daten der Basisstudie die ersten beiden Schlafzyklen der Nacht C der Expositionsgruppe mit denen der Nacht B verglichen.

Die Auswertung der ersten zwei Schlafzyklen zwischen den Nächten B und C innerhalb der Expositionsgruppe zeigte weder in den Schlafstadien II und III noch im REM-Schlaf signifikante Leistungsunterschiede. Zwar existierten verschiedene statistisch relevante Frequenzbereiche ($p\text{-Wert} \leq 0,05$), allerdings war die zugehörige Amplitudenhöhe zu gering (Leistungsdifferenz < 2).

Da die Analyse der ersten zwei Schlafzyklen zwischen den Nächten B und C innerhalb der Expositionsgruppe keine Auffälligkeiten zeigte, ist davon auszugehen, dass der beobachtete Abfall der spektralen Leistung im REM-Schlaf im Delta-Band der Expositionsgruppe beim Vergleich mit der Kontrollgruppe auf eine zufällige spektrale Schwankung zurückzuführen war. Denkbar wäre auch, dass die beiden Gruppen unterscheidbar waren. Allerdings widersprechen dem die Ergebnisse der Hypothese B, welche die Annahme identischer Gruppen bestätigten.

Die Ergebnisse der Borbély-Studie konnten somit nicht reproduziert werden. Möglicherweise wurden die von Borbély beobachteten Veränderungen in der ersten NonREM-Schlafphase auch durch das viertelstündlich abwechselnd ein- bzw. ausgeschaltete elektromagnetische Feld ausgelöst. Da in dieser Studie das elektromagnetische Feld in der Expositionsgruppe permanent ab der dritten Nacht eingeschaltet war, wäre ein derartiger Effekt nicht festzustellen gewesen.

Auch Fritzer et al. [Fritzer et al., 2007] konnte die Ergebnisse der Borbély-Studie nicht reproduzieren. Er untersuchte in seiner Arbeit die ersten beiden Schlafzyklen im REM- und im NonREM-Schlaf bei Exposition durch das elektromagnetische Feld und verglich die Leistungsspektren mit denen der Referenznacht. Fritzer konnte keine signifikanten Unterschiede feststellen.

Betrachtet man die Ergebnisse der Untersuchungen dieser Studie zu den Hypothesen A bis D in ihrer Gesamtheit, so waren interessanterweise wenn überhaupt nur im REM-Schlaf wesentliche Veränderungen zu beobachten. Zwar stellten sich die Unterschiede allesamt als vermutlich statistische Schwankungen heraus, dennoch ist nicht auszuschließen, dass die hypothesenabhängig untersuchten Probandenkollektive jeweils eine zu geringe Probandenzahl aufwiesen, um signifikante Effekte aufdecken zu können. Weitere Studien unter kontrollierten Bedingungen könnten dazu beitragen, die festgestellten Veränderungen sicher als zufällige Schwankungen einzustufen.

6. Zusammenfassung

Mit der zunehmenden Verbreitung des Mobilfunks hat auch die Frage nach einer möglichen Schädigung der menschlichen Gesundheit durch die ausgesandte elektromagnetische Strahlung an Bedeutung gewonnen. Ein Mobiltelefon erzeugt im Gesprächsbetrieb ein elektromagnetisches Feld, dem insbesondere der Kopf ausgesetzt ist. Dieses Feld steht in dem Verdacht, elektrophysiologische Prozesse zu beeinflussen. Gerade Schlafstörungen werden immer wieder auf die elektromagnetische Strahlung der Mobiltelefone oder anderer elektrischer Geräte zurückgeführt.

In bereits veröffentlichten Studien wurden sowohl Kurzzeiteffekte durch elektromagnetische Felder in dem ersten Schlafzyklus als auch eine Langzeitauswirkung über acht aufeinander folgende Nächte beobachtet.

Borbély et al. fanden als Kurzzeiteffekt eines viertelstündlich an- und ausgeschalteten elektromagnetischen Feldes eine signifikante Verkürzung der Wachzeiten sowie eine unter der Exposition in den ersten NonREM-Schlafphasen erhöhte spektrale Leistung im Alpha- und im Beta-Band [Borbély et al., 1999].

In der Basisstudie von Wachter schliefen die randomisiert in eine Expositions- und eine Kontrollgruppe aufgeteilten zwanzig männlichen, gesunden Probanden jeweils acht aufeinander folgende Nächte in einer reflexionsarmen Kammer. Die Expositionsgruppe war nach einer Adaptationsnacht und einer weiteren Referenznacht doppelblind für sechs Nächte einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt. Es wurde die Bedingung simuliert, dass ein eingeschaltetes Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb neben dem Kopfkissen des Schlafenden lag und den Kopf einem gleichmäßigen elektromagnetischen Feld aussetzte [Wachter, 2005]. Wachter beobachtete, dass ein eingeschaltetes Mobiltelefon im Gesprächsbetrieb neben dem Kopfkissen keine Schlafstörung an sich produziert, aber die natürliche Erholung von anderweitig bedingten Schlafstörungen verhindert oder verlangsamt.

Die beiden Studien von Wachter und Borbély warfen vor allem vier Hypothesen auf, die es in dieser vorgelegten Folgestudie zu untersuchen galt:

Hypothese A: Der von Wachter gemessene Langzeiteffekt ist ein tatsächlicher Einfluss der elektromagnetischen Strahlung, welcher sich kontinuierlich mit zunehmender Anzahl der Ableitnächte immer deutlicher manifestiert.

Hypothese B: Die Anzahl der Probanden in der Studie von Wachter war zu gering, weshalb die Annahme identischer Gruppen nicht erfüllt werden konnte.

Hypothese C: Nach einer Langzeituntersuchung hat die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf.

Hypothese D: Die Resultate der Borbély-Studie sind mit den Daten von Wachters Basisstudie annäherungsweise zu reproduzieren.

Für die Überprüfung des möglichen Langzeiteffektes (Hypothese A) wurden in dieser Arbeit die in der Basisstudie von Wachter aufgezeichneten elektroenzephalographischen Ableitungen der zweiten und der siebten Nacht in Abhängigkeit von den einzelnen Schlafstadien einer Frequenzanalyse unterzogen. Der Vergleich der berechneten Leistungsspektren zeigte weder für die Kontroll- noch für die Expositionsgruppe statistisch signifikante Veränderungen in den Schlafstadien II, III und IV. In REM-Schlaf beider Gruppen war in der vorletzten Nacht eine Abnahme der Leistung in allen Frequenzbändern zu beobachten.

Da die Leistung im REM-Schlaf sowohl in der Expositions- als auch in der Kontrollgruppe über alle Frequenzbereiche abfiel, konnte ein Effekt durch das elektromagnetische Feld ausgeschlossen werden. Die abweichenden Ergebnissen von Wachter deuteten daraufhin, dass es sich bei dem Leistungsabfall in der vorletzten Nacht und auch bei dem von Wachter beobachteten veränderten Spektrum in der letzten Nacht um zufällige spektrale Schwankungen handelte. Aufgrund dieser Erkenntnisse ließ sich ein Langzeiteffekt nicht bestätigen.

Um zu überprüfen, ob die Anzahl der Probanden in der Basisstudie von Wachter zu gering war und die Annahme identischer Gruppen deshalb nicht erfüllt werden konnte (Hypothese B), schliefen in dieser Studie erneut sechs Probanden acht Nächte in Folge ohne Exposition durch das elektromagnetische Feld. Vier dieser Testpersonen nahmen zuvor in der Expositionsgruppe der Basisstudie teil. Hiermit konnte ein Cross-Over-Design teilrealisiert werden. Wie in der Studie von Wachter wurden die Leistungsdifferenzen der dritten und zweite Nacht sowie die der achten und zweite Nacht untersucht.

In beiden Nächten ließen sich nach der statistischen Auswertung keine signifikanten Veränderungen in Bezug auf die zweite Nacht feststellen. Wachter hingegen beobachtete in der Nacht H der Kontrollgruppe eine deutliche Abnahme der spektralen Leistung im Delta-Band des Schlafstadiums III sowie eine Leistungssteigerung im REM-Schlaf im gesamten

ausgewerteten Spektrum. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass der von Wachter beobachtete Effekt vermutlich auf einen methodischen Fehler in der Auswertung zurückzuführen war und tatsächlich identische Gruppen vorlagen.

Zur Überprüfung der Theorie, dass nach einer Langzeituntersuchung die letzte Ableitnacht einen besonderen Einfluss auf den Schlaf hat (Hypothese C), schiefen in dieser Folgestudie sechs gesunde männliche Probanden anstelle von acht Nächten vierzehn Nächte in Folge unter den gleichen Bedingungen wie die Kontrollgruppe der Basisstudie, d.h. ohne Exposition durch das elektromagnetischen Feld.

Zusätzlich zu den auch in der Basisstudie spektralanalytisch ausgewerteten dritten und achten Nächten wurden auch die Leistungsspektren der vierzehnten Ableitnacht mit denen der zweiten Nacht verglichen.

In der dritten Nacht zeigten sich keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu der zweiten Nacht. Auch in der achten und der vierzehnten Nacht waren in den Schlafstadien II, III und IV keine relevanten Veränderungen zu der Nacht B festzustellen. Im REM-Schlaf der achten Nacht ließ sich an drei Ableitpositionen ein Anstieg der Leistung in allen Frequenzbändern beobachten. Im REM-Schlaf der vierzehnten Nacht trat lediglich an einer Ableitposition eine signifikante Leistungsabnahme im Beta-Band auf.

Die Auswertung der drei Nächte zeigte zwar zum Teil verschiedene signifikante Leistungsunterschiede, es ergaben sich jedoch keine Hinweise auf kumulative Effekte. Die Resultate der spektralanalytischen Auswertung deuten daher auf zufällige spektrale Schwankungen hin, die Ergebnisse der Basisstudie konnten nicht reproduziert werden. Die letzte Ableitnacht scheint keinen besonderen Einfluss auf den Schlaf zu haben.

Zur Verifikation der Borbély-Ergebnisse (Hypothese D) wurden in dieser Arbeit die ersten beiden Schlafzyklen der dritten Nacht aus dem Datenbestand der Kontroll- und der Expositionsgruppe der Basisstudie von Wachter spektralanalytisch ausgewertet und mit denen der jeweils anderen Gruppe verglichen. Zusätzlich wurden die ersten beiden Schlafzyklen der dritten Nacht der Expositionsgruppe mit denen der zweiten Nacht verglichen.

Die Untersuchung der Expositions- mit der Kontrollgruppe innerhalb der ersten zwei Schlafzyklen zeigte lediglich im REM-Schlaf des zweiten Zyklus einen Abfall der spektralen Leistung im Delta-Band in der Expositionsgruppe, welcher vermutlich auf zufällige spektrale Schwankungen zurückzuführen war. Bei der Auswertung der ersten zwei Schlafzyklen der zweiten und der dritten Nacht innerhalb der Expositionsgruppe waren keine signifikanten

Leistungsunterschiede festzustellen. Die Ergebnisse der Borbély-Studie konnten somit nicht reproduziert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass weder die Resultate von Wachter noch die der Borbély-Studie in der vorgelegten Arbeit reproduziert werden konnten. Die Ergebnisse dieser Folgestudie sprechen dafür, dass das elektromagnetische Feld eines modernen Mobiltelefons im Gesprächsbetrieb keinen Einfluss auf den Schlaf nimmt.

7. Literaturverzeichnis

- Altpeter E.S., Roosli M., Battaglia M., Pfluger D., Minder C.E., Abelin T. (2006): Effect of short-wave (6 – 22 MHz) magnetic fields on sleep quality and melatonin cycle in humans: The Schwarzenburg shut-down study. *Bioelectromagnetics* 27: 142 – 150.
- Bell G., Marino A., Chesson A., Struve F. (1992): Electrical states in the rabbit brain can be altered by light and electromagnetic fields. *Brain Res.* 570: 307 – 315.
- Berger H. (1929): Über das Elektroenkephalogramm des Menschen, *Arch. f. Psychiatr.* 87: 527 – 570.
- BImSchV (1996): Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Verordnung über elektromagnetische Felder – 26 BImSchV, 1996.
- Blackman D.F., Elder J.A., Weil C.M., Benane S.G., Eichinger D.C., House P.E. (1979) : Introduction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: Effects of modulation frequency and field strength. *Radio. Sci.* 14 (Suppl. 6): 93 – 98.
- Borbély A.A., Huber R., Graf T., Fuchs B., Gallmann E., Achermann P. (1999) : Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci. Lett.* 275: 207 – 210.
- Cleary S.F., Liu L.-M., Merchant R.E. (1990): In vitro lymphocyte proliferation induced by radio-frequency electromagnetic radiation under isothermal conditions. *Bioelectromagnetics* 11: 47 – 56.
- Cooley J.W., Tukey J.W., (1965): An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* 19: 297 – 301.
- DIN VDE 0848 (1991): Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Schutz vor Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz, Teil 2.
- DIN VDE 0848 (2000): Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern – Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren.
- D’Costa H., Truemann G., Tang L. Abdel-rahman U., Abdel-rahman W., Ong K., Cosic I. (2003): Human brain wave activity during exposure to radiofrequency field emissions from mobile phones. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 26 : 162 – 167.
- Driver H.S. Dijk D.-J., Werth E., Biedermann K., Borbély A.A. (1996) : Sleep and the sleep electroencephalogram across the menstrual cycle in young healthy women. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 81: 728 – 735.

-
- Fritzer G., Göder R., Friege L., Wachter J., Hansen V., Hinze-Selch D., Aldenhoff J.B. (2007): Effects of short- and long-term pulsed radiofrequency electromagnetic fields on night sleep and cognitive functions in healthy subjects. *Bioelectromagnetics* 28: 316 – 325.
- Haimov I., Lavie P. (1997): Circadian characteristics of sleep propensity function in healthy elderly: a comparison with young adults. *Sleep* 20 (4): 294 – 300.
- Huber R., Schuderer J., Graf T., Jütz K., Borbély A.A., Kuster N., Achermann P. (2003): Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate. *Bioelectromagnetics* 24: 262 – 276.
- Jasper H. (1958): The ten-twenty electrode system of the international federation. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 10: 371 – 374.
- Lai H., Carino M.A., Horita A., Guy A.W. (1989) : Low-level microwave irradiation and central cholinergic activity : A dose-response study. *Bioelectromagnetics* 10: 203 – 208.
- Lipman R.M., Tripathi B.J. Tripathi R.C. (1988): Cataracts induced by microwave and ionizing radiation. *Surv. Ophthalmol.* 33 (3): 200 – 210.
- Loughran S.P., Wood A.W., Barton J.M., Croft R.J., Thompson B., Stough C. (2005): The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep. *Neuroreport* 16: 1973 – 1976.
- Mann K., Röschke J. (1996): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33: 41 – 47.
- Mann K., Röschke J. (2004): Sleep under exposure to high-frequency electromagnetic fields. *Sleep Med. Rev.* 8: 95 – 107.
- Morgan R.W., Kelsh M.A., Zhao K., Exuzides A., Heringer S., Negrete W. (2000): Radiofrequency exposure and mortality from cancers of the brain and lymphatic / hematopoietic systems. *Epidemiology* 11: 118 – 127.
- Perrson B.R.R., Salford L.G., Brun A. (1997): Blood-brain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication. *Wireless Networks* 3: 455 – 461.
- Pschyrembel W. (2002): *Klinisches Wörterbuch*, 259. Aufl., De Gruyter, Berlin

-
- Rechtschaffen A., Kales A. (1968): A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Brain Information Service, University of California, Los Angeles.
- Rothman K.J. (2000): Epidemiological evidence on health risks of cellular telephones. *Lancet* 356: 1837 – 1840.
- Schüller M., Streckert J., Menzel K., Eicher B. (2000): Proposal for generic GSM test signal. The Bioelectromagnetics Society, 22nd Annual Meeting: 122 – 123.
- Toussaint M., Luthringer R., Schaltenbrand N. (1997) : Changes in the EEG power density during sleep laboratory adaption. *Sleep* 20 (12): 1201 – 1207.
- Van Leeuwen G.M., Lagendijk J.J., Van Leersum B.J., Zwamborn A.P., Hornsleth S.N., Kotte A.N. (1999): Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. *Phys. Med. Biol.* 44: 2367 – 2379.
- Vorobyov V.V., Galchenko A.A., Kukushkin N.I., Akoev I.G. (1997): Effects of weak microwave fields amplitude modulated at ELF on EEG of symmetric brain areas in rats. *Bioelectromagnetics* 18: 293 – 298.
- Wachter J. (2005): Lang- und Kurzzeituntersuchung über den Einfluss elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf das Frequenzspektrum des menschlichen Schlafelektroenzephalogramms. Doktorarbeit, Universität Kiel.
- Wagner P., Röschke J., Mann K., Hiller W., Frank C. (1998): Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions. *Bioelectromagnetics* 19: 199 – 202.
- Wagner P., Röschke J., Mann K., Fell J., Hiller W., Frank C., Grozinger M. (2000): Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields. Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. *Neuropsychobiology* 42: 207 – 212.
- Wertheimer N., Leeper E. (1979): Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.* 109: 273 – 284.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. J. B. Aldenhoff für die Überlassung des Themas und Förderung meiner Arbeit, bei Dr. G. Fritzer für die hervorragende Betreuung und seine konstruktiven Ratschläge sowie bei allen Mitarbeitern des Schlaflabors der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie des Zentrums für Integrative Psychiatrie gGmbH, insbesondere bei S. Dardemann und M. Grahl, für die stete Hilfsbereitschaft und gute Zusammenarbeit.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglichten, sowie meinem Mann Torsten, der mir stets den Rücken gestärkt und frei gehalten hat.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Kathrin Maaß, geb. Wenske
Adresse: Begel 19, 22359 Hamburg
Familienstand: verheiratet, keine Kinder
Geburtsdaten: 01. Januar 1978, Bielefeld

Schulbildung:

1984 – 1988 Grundschole in Lipperreihe
1988 – 1997 Hans-Ehrenberg-Schule (Gymnasium) in Sennestadt

Hochschulbildung:

10 / 1997 – 05 / 2004 Studium der Humanmedizin,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
08 / 1999 Ärztliche Vorprüfung
08 / 2000 Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
03 / 2003 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
04 / 2003 – 03 / 2004 Praktisches Jahr – Tertiale:
I. Innere Medizin im Kreiskrankenhaus Rendsburg
II. Chirurgie:
1. Hälfte im Kreiskrankenhaus Rendsburg
2. Hälfte im Dunedin Hospital, Neuseeland
III. Dermatologie im Uniklinikum Schleswig-Holstein, Campus
Kiel
05 / 2004 Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
10 / 2004 Approbation als Ärztin

Berufserfahrung:

06 / 2004 – 09 / 2004 Ärztin im Praktikum in der Inneren Abteilung der
Klinik Preetz
10 / 2004 – 11 / 2006 Assistenzärztin in der Inneren Abteilung der
Klinik Preetz
12 / 2006 – 08 / 2007 Assistenzärztin in der Chirurgischen Abteilung der
AK Segeberger Kliniken GmbH
09 / 2007 – 06 / 2009 Weiterbildungsassistentin in der Praxis für
Allgemeinmedizin Dr. M. Grellmann, Norderstedt
06 / 2009 Facharztprüfung für Allgemeinmedizin
seit 07 / 2009 Angestellte Fachärztin der Praxis für
Allgemeinmedizin Dr. M. Grellmann, Norderstedt