Effekte von WLAN-Exposition auf den Schlaf

FSM-Projekt Nr. A2016-01

Abschlussbericht

14.04.2020

erstellt für die

FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation
FSM – Swiss Research Foundation for Electricity and Mobile Communication

Projektleitung:

Prof. Dr. rer. nat. Heidi Danker-Hopfe und
Dr.-Ing. Hans Dorn

Kompetenzzentrum Schlafmedizin CC15
Charité - Universitätsmedizin Berlin
Hindenburgdamm 30
12203 Berlin
T +49 (0) 30 450 517 571
F +49 (0) 30 450 517 941
E-mail: heidi.danker-hopfe@charite.de
hans.dorn@charite.de

Dipl.-Ing Gernot Schmid

Seibersdorf Laboratories
2444 Seibersdorf, TechGate Vienna
Donau-City-Straße 1,
A-1220 Wien, Österreich
E-mail: Gernot.Schmid@seibersdorf-laboratories.at

Abschlussbericht erstellt von:

Prof. Dr. rer. nat. Heidi Danker-Hopfe
Dr.-Ing. Hans Dorn

Bericht zur Exposition erstellt von:

Dipl.-Ing. Gernot Schmid
MSc Rene Hirtl
MSc Richard Überacher

unter Mitwirkung von:

MSc Ana Bueno-Lopez
Dr. rer. nat. Torsten Eggert
Kompetenzzentrum Schlafmedizin CC15, Charité - Universitätsmedizin Berlin

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation) übereinstimmen.

Danksagung:

Unser Dank gilt all denen, die zum Gelingen des Projekts bisher beigetragen haben:

1. den **Probanden**, die sich der Mühe unterzogen haben, insgesamt fünf Nächte in unserem Labor zu verbringen.

2. den **Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Kompetenzzentrums für Schlafmedizin sowie den Projektmitarbeitern und Projektmitarbeiterinnen**: Frau M.Sc. Ana Bueno-Lopez, die als wissenschaftliche Mitarbeiterin das Projekt betreut hat, Dr. rer. nat. Torsten Eggert, der mit seinen Erfahrungen aus bisherigen Hochfrequenzstudien beratend das Projekt unterstützt hat, Dr. Dr. med. Steffen Richter, Dr. med. Marie-Luise Hansen und Florentine Seifert für das sorgfältige Probandenscreening sowie Herr B.Sc. Moritz Götsch, der im Rahmen des Projekts seine Master Thesis im Fachbereich Biologie ausgeführt hat. Alle Mitarbeiter haben mit großem Engagement und persönlicher Flexibilität zur hohen Datenqualität und zügigen Durchführung der Datenerhebung und Auswertung beigetragen.

3. den **studentischen Mitarbeitern** und **Mitarbeiterinnen** (in alphabetischer Reihenfolge): Svenja Döblin, Moritz Götsch, Benjamin Seegert, Marcus Nickel, Louisa Spieß und Sarah Wehmeier, von denen die Probanden in der Nacht zuverlässig betreut wurden. Auch sie haben große Flexibilität und Bereitschaft zur Übernahme von Verantwortung gezeigt.

4. Herrn **Dipl.-Ing. Gernot Schmid** von den **Seibersdorf Laboratories**, 2444 Seibersdorf, Österreich sowie seinen Mitarbeitern Herrn MSc Rene Hirtl und Herrn MSc Richard Überacher für die Entwicklung, die dosimetrische Charakterisierung der Expositionsanlage sowie die Überwachung der Exposition.

5. Herrn **Dr. Jürg Fröhlich** von der ETH Zürich für die freundliche und kompetente Beratung im Zusammenhang mit der Entwicklung der Expositionsanlage.

6. Herrn **Dr. Gregor Dürrenberger** von der Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation, der uns in diesem Projekt als stets fachkompetenter Ansprechpartner betreut hat.

Inhaltsverzeichnis

I Zusammenfassung 7
II Hintergrund 11
III Zielsetzung 15
IV Design der Studie 16
V Einrichtung der Laborumgebung 20
V.1 Gestaltung des Messraums 20
V.2 Technische Bedingungen für den Messplatz 21
V.3 Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität bei EEG-Ableitung unter Exposition 21
V.4 Überprüfung der Polysomnographie-Aufzeichnungen auf Störungen 23
VI Bericht zum Aufbau einer Expositionseinrichtung 26
VII Probanden 27
VII.1 Überlegungen zur Stichprobengröße 27
VII.2 Verfahren zur Probandenrekrutierung 31
VII.2.1 Stufe 1: Telefoninterview 31
VII.2.2 Stufe 2: Fragebögen 32
VII.2.2.1 Allgemeiner Schlaffragebogen (ASF) 32
VII.2.2.2 Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI) 32
VII.2.2.3 Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB) 33
VII.2.2.4 Schlaftagebuch 33
VII.2.2.5 Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS) 33
VII.2.2.6 Gesundheitsfragebogen für Patienten (depressive Symptome PHQ-9) 34
VII.2.2.7 Gesundheitsfragebogen für Patienten (somatische Symptome PHQ-15) 34
VII.2.2.8 Umweltfaktoren und WLAN 34
VII.2.3 Stufe 3: Medizinische Untersuchung 35
VII.2.4 Stufe 4: Polysomnographische Screening-Untersuchung 36
VII.3 Ein- und Ausschlusskriterien 38
VII.4 Probandenrekrutierung 40
VIII Methodik der Datenerhebung 43
VIII.1 Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren während der Studie 43
VIII.1.1 Abend- und Morgenprotokolle 43
VIII.1.2 Visuelle Analogskalen (VAS) 43
VIII.1.3 Positive and Negative Affect Schedule (PANAS) 44
VIII.1.4 State-Trait-Angst-Inventar (STAI) 44
VIII.1.5 Gießener Beschwerdebogen (GBB-24) 45

VIII.1.6 Einschätzung der Exposition durch die Probanden 45
VIII.2 Subjektive Schlafqualität 45
VIII.3 Polysomnographie (PSG) 45
VIII.3.1 Makrostruktur des Schlafs 46
VIII.3.2 Mikrostruktur des Schlafes 48
VIII.4 Gedächtnistests 50
VIII.4.1 Deklaratives Gedächtnis: Wortpaarassoziationstest (WPT) 50
VIII.4.2 Emotionales Gedächtnis: Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung (FRT) 51
VIII.4.3 Prozedurales Gedächtnis: Sequentielle Finger-Tapping Aufgabe (SFTT) 53
VIII.4.4 Kontrolltests 54
IX Statistische Auswertung 55
X Ergebnisse und Diskussion 58
X.1 Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren 58
X.1.1 Morgenprotokoll - Studienverblindung 58
X.1.2 Visuelle Analogskalen 58
X.1.3 Positive and Negative Affect Schedule (PANAS) 63
X.1.4 Stait-Trait-Angstinventar (STAI) 65
X.1.5 Gießener Beschwerdebogen (GBB-24) 67
X.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf die mittels Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren erhobenen Daten zur Befindlichkeit 69
X.2 Subjektive und objektive Schlafparameter 70
X.2.1 Einfluss der Erwartung der Exposition 70
X.2.2 Baselinenächte 70
X.2.3 Subjektive Schlafparameter 73
X.2.4 Makrostruktur des Schlafs 74
X.2.5 Mikrostrukturen des Schlafs 80
X.2.5.1 Arousal 80
X.2.5.2 Power des Schlaf-EEGs in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln 81
X.2.5.3 Power des Schlaf-EEGs in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen 85
X.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf den Schlaf 93
X.3 Gedächtniskonsolidierung 94
X.3.1 Deklaratives Gedächtnis 94
X.3.2 Prozedurales Gedächtnis 97
X.3.3 Emotionales Gedächtnis 98
X.3.4 Kontrolltests 100

X.3.4.1 Digit Span Test (DST) 100
X.3.4.2 Regensburger Wortflüssigkeitstest (RWT) 101
X.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf die Gedächtnis- und Kontrolltests 104
XI Schlussfolgerung 106
XII Literaturverzeichnis 107
XIII Abkürzungsverzeichnis 113
XIV Abbildungsverzeichnis 117
XV Tabellenverzeichnis 120

I Zusammenfassung

Einleitung: Drahtlose lokale Netzwerke (WLAN, Wi-Fi) werden seit einigen Jahren weit verbreitet in Haushalten betrieben. Viele Menschen fühlen sich durch die Anwesenheit von Hochfrequenztechnologien gesundheitlich beeinträchtigt. Schlafprobleme gehören zu den am häufigsten beklagten Beschwerden. Die vorliegende Studie soll zur Klärung beitragen, inwieweit es objektivierbare, biologische Effekte einer Wi-Fi-Exposition auf den Schlaf gibt. Die Ergebnisse der Studie sollen die aktuelle Datenlage zu möglichen akuten Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition qualitativ erweitern und können zur Klärung von Fragen der Menschen bezüglich eines Hochfrequenzeinflusses auf den Schlaf herangezogen werden.

Methoden: In einem doppel-blinden, sham-kontrollierten Laborexperiment mit randomisiertem Crossover-Design der Expositionsbedingungen wurde die subjektive Schlafqualität von Versuchspersonen durch Fragebögen erfasst und die objektive Mikro- und Makrostruktur des Schlafes mittels Polysomnographie gemessen. Weiterhin wurde eine mögliche Beeinflussung der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung überprüft. Dazu wurden Aufgaben zum deklarativen, prozeduralen und emotionalen Gedächtnis durchgeführt. Zur Exposition der Versuchspersonen wurde eine speziell entwickelte Anlage eingesetzt. Damit wurde eine doppel-blinde Versuchsdurchführung und -überwachung ermöglicht und es konnten definierte Expositionsparameter erreicht werden. Es wurden Feldstärken und Signale eines in der Nähe einer schlafenden Person installierten WLAN-Access Points nachgebildet. Die Frequenz des Wi-Fi-Expositionssignals betrug 2,45 GHz. Die über 10 g Gewebe gemittelte maximale räumliche Absorptionsrate im Kopf (psSAR10g) wurde auf 25 mW/kg (während Wi-Fi-Übertragungsbursts) bzw. 6,4 mW/kg gemittelt über 6 min begrenzt. Im Hirngewebe entspricht dies psSAR10g Werten von höchstens 3,5 mW/kg (Maximum während der Bursts) und höchstens 0,9 mW/kg (über 6 min gemittelt). Diese SAR-Werte können in einem realistischen Worst-Case Scenario durch eine von WLAN-Geräten verursachte Exposition im Bereich 2,45 GHz entstehen.

Ergebnisse: Eine Wi-Fi-Exposition während der gesamten Nacht zeigte weder auf subjektive Schlafparameter noch auf objektive Parameter, welche die Makrostruktur des Schlafes beschreiben, einen signifikanten Einfluss. Eine Analyse der Schlafstadien-spezifischen Powerspektralwerte des Schlaf EEGs zeigte unter Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham eine Reduktion der globalen Power im Alpha Frequenzband (8.00 – 11.75 Hz) im NREM Schlaf. Weitere Mikrostrukturen des Schlafes wie die Power langsamer Oszillationen und die Power im Spindelfrequenzbereich sowie die Anzahl der Arousal zeigten keine von der Exposition abhängigen signifikanten Variationen. Während die Veränderungen über Nacht beim emotionalen und prozeduralen Gedächtnis ebenfalls nicht in Abhängigkeit von der

Exposition variierten, war die Verbesserung des deklarativen Gedächtnisses über Nacht unter Wi-Fi signifikant stärker ausgeprägt als unter Sham.

Diskussion: Die Ergebnisse der vorliegenden experimentellen Studie stehen in Einklang mit anderen neurophysiologischen Studien, die zeigen, dass eine akute Hochfrequenzexposition keinen konsistenten Einfluss auf die Makrostruktur des Schlafes hat. Die unter Wi-Fi beobachteten leichten physiologischen Veränderungen der EEG-Power spiegeln sich weder in der subjektiv wahrgenommenen Schlafqualität noch in der objektiv gemessenen Makrostruktur des Schlafes wider. Unabhängig von der Expositionsbedingung zeigten sich am Morgen im Vergleich zum Abend bessere Leistungen in allen Gedächtnistests. Die Beobachtung, dass diese Verbesserung beim deklarativen Gedächtnistest unter Wi-Fi-Exposition statistisch signifikant ausgeprägter war als unter Sham, fand jedoch keine Entsprechung in den auf physiologischer Ebene beobachteten Ergebnissen. Langsame Oszillationen und die Power im Sigma-Frequenzband, die im Zusammenhang mit deklarativen Gedächtnisprozessen diskutiert werden, waren nicht von der Exposition beeinflusst. Aufgrund dieser Inkonsistenzen könnte die Beobachtung einer signifikant ausgeprägten Veränderung über Nacht unter Wi-Fi-Exposition als Zufallsbefund gewertet werden. Insgesamt lassen sich die Ergebnisse nicht im Sinne eines schlafstörenden Effekts von Wi-Fi-Exposition interpretieren.

Summary

Introduction: For several years Wireless Local Area Networks (WLAN, Wi-Fi) are widely spread and operated in households. Many people feel that the presence of radiofrequency technologies impairs their health. Sleep problems are among the most often complained symptoms. The present study aims to contribute to answer the question, whether biological effects of a Wi-Fi exposure can be assessed by objective measures. The results of this study can expand the database on possible acute effects of Wi-Fi exposure and thus qualitatively contribute to the discussion whether sleep is affected by exposure from radiofrequency electromagnetic fields.

Methods: The study was performed as a double-blind, sham-controlled experiment in the sleep laboratory with exposure conditions delivered in a balanced randomized cross-over design. Subjective sleep quality of volunteers was assessed by questionnaires. Macro- and microstructure of sleep were measured by polysomnography. Furthermore, a possible impact on sleep related memory consolidation was tested. To do so, declarative, procedural and emotional memory tasks were used. Exposure was delivered by a specially developed system. This allowed for a double-blind implementation and monitoring as well as for the realization of defined exposure parameters. Field strengths and signals exposing a subject sleeping in the close proximity of a Wi-Fi access point were simulated. The frequency of the Wi-Fi signal was at 2.45 GHz, the peak spatial specific absorption rate at head locations, averaged over any 10 g tissue (psSAR10g) was limited to 25 mW/kg maximum (Wi-Fi transmission burst) or 6.4 mW/kg for an average over 6 min, respectively. For brain tissues the corresponding values of psSAR10g were 3.5 mW/kg (maximum during burst) or 0.9 mW/kg (6 min average). These SAR values can be considered as a realistic worst case exposure from 2.45 GHz Wi-Fi devices in practice.

Results: A whole night Wi-Fi exposure did neither show a statistically significant effect on subjective sleep parameters nor on objective parameters describing the macrostructure of sleep. An analysis of sleep stage-specific power spectral values of the sleep EEG revealed a reduction of global EEG power in the alpha frequency band (8.00 - 11.75 Hz) during NREM sleep under acute Wi-Fi exposure compared to sham. Other microstructures of sleep such as the power in the slow oscillation and in the spindle frequency ranges as well as the number of arousals did not show any significant exposure-related variations. While overnight changes in emotional and procedural memory did also not vary with exposure, the overnight improvement in declarative memory was significantly more pronounced under Wi-Fi than under sham.

Discussion: The results of the present human experimental study are well in line with other neurophysiological studies showing that acute RF-EMF exposure does not have a consistent effect on

the macrostructure of sleep. The slight physiological changes in EEG power observed under Wi-Fi are reflected neither in the subjectively perceived sleep quality nor in the objectively measured macrostructure of sleep. Regardless of the exposure condition, all memory tests showed better performance in the morning compared to the evening. However, the observation that the overnight improvement in the declarative memory test was statistically significantly more pronounced under Wi-Fi exposure than under sham was not supported by the results observed at the physiological level. EEG power values in the slow oscillations and in the sigma frequency band, which are discussed to be involved in declarative memory processes, were not affected by exposure. Due to these inconsistencies, the observation of a significant overnight change under Wi-Fi exposure could be considered a random finding. Overall, the present results are not indicative of a sleep disturbing effect of Wi-Fi exposure.

II Hintergrund

Für die Mehrheit der Bevölkerung sind drahtlose Kommunikationstechniken im täglichen Leben nahezu unverzichtbar geworden. Ein vom Standort unabhängiger Internetzugang kann u.a. durch Wireless Local Area Network (WLAN) Access Points realisiert werden, die gewöhnlich über einen Router bereitgestellt werden. Wie die meisten anderen kabellosen Kommunikationssysteme nutzen die gegenwärtig verfügbaren WLAN-Systeme elektromagnetische Felder im Hochfrequenzbereich [HF im Sinne von ICNIRP (2020): 100 kHz – 300 GHz] zur Informationsübertragung. Die Basis der WLAN Technologie, die für eine Datenkommunikation mit kurzer Reichweite entwickelt wurde, ist die Serie der IEEE 802.11 Standards. Diese WLAN Technologie wird mit dem Wort Wi-Fi bezeichnet, das sich an die Begriffe High Fideltiy (Hi-Fi) und Wireless anlehnt. Neben der gegenwärtig am stärksten verbreiteten 2.45 GHz Technologie (mit erlaubter Sendeleistung von 100 mW EIRP) wird zunehmend auch das 5 GHz Frequenzband genutzt, in dem, je nach genutztem Subband, Spitzensendeleistungen bis zu 1 W EIRP zulässig sind (ETSI, 2012). In Deutschland sind beispielsweise Sendeleistungen bis zu 200 mW EIRP im 5.15-5.25 GHz Band erlaubt und im 5.27-5.73 Band bis zu 1 W EIRP, vorausgesetzt es sind Mechanismen zur Vermeidung gegenseitiger Störungen implementiert (Leistungsregelung). Die typische EIRP der Sender bleibt damit auch im 5 GHz Frequenzbereich unter 1 W EIRP.

Um eine adäquate Wi-Fi-Versorgung sicherzustellen, ist die Zahl öffentlicher und privater Accesspoints in den vergangenen Jahren stetig gestiegen. Eine am Ende des Jahres 2007 im Auftrag der Europäischen Kommission an 26.730 EU-Bürgern in 27 Mitgliedsstaaten durchgeführte E-Kommunikationsstudie zeigte, dass zu dem Zeitpunkt 22% der Teilnehmer einen Wi-Fi-Router zu Hause nutzte. Vergleichen mit den zwei vorhergehenden Jahren war dies ein Anstieg von 8% bzw. 11% (TNS Opinion & Social, 2008). Auch im SCENIHR-Bericht (SCENIHR 2015) wird erwähnt, dass die Anzahl der Quellen elektromagnetischer Felder (einschließlich Wi-Fi) in geschlossenen Räumen über die Jahre angestiegen ist. Die Installation einer großen Anzahl von Basisstationen mit kurzer Reichweite für mobile/kabellose Kommunikation nach verschiedenen Standards hat im Alltag zu kürzeren Abständen zu den Sendern geführt. Aufgrund der geringen maximalen EIRP von z.B. Wi-Fi-Komponenten bleibt die kumulative Exposition mehrerer dieser Geräte jedoch marginal im Vergleich zu den Referenzwerten der internationalen Richtlinien (SCENIHR 2015).

Nichtsdestotrotz sind Wi-Fi-Router in der häuslichen Umgebung insbesondere in kleinen Wohnungen und Häusern oft in unmittelbarer Nähe von Schlafplätzen installiert. Unter gewissen Umständen könnte daher die resultierende Wi-Fi-Exposition in dieser besonderen Mikroumgebung höher sein als die Exposition durch andere Quellen. Breckenkamp et al. (2012) haben in 1.348 deutschen Schlafzimmern im Zeitraum von 8:00 bis 21:00 Uhr an vier vordefinierten Positionen die Hochfrequenzexposition

gegenüber verschiedener Quellen gemessen. Sie beobachteten, dass in diesem speziellen Wohnbereich weder Mobiltelefone noch Rundfunk die dominierenden Quellen für Hochfrequenzexposition waren, sondern Schnurlostelefone und Wi-Fi. Zusammengenommen machten diese beiden Quellen 82% der Gesamtexposition aus. In einer Studie von Tomitsch & Dechant (2015) wurden Ergebnisse von am Tag durchgeführten Punktmessungen zur Hochfrequenzexposition am Bett in 103 Haushalten berichtet. Die Messungen wurden in den Jahren 2006, 2009 und 2012 durchgeführt und sollten eine typische Nachtsituation simulieren. Die Autoren konnten zeigen, dass im häuslichen Umfeld die Hochfrequenzexposition im Wi-Fi-Frequenzbereich im Laufe der Jahre zugenommen hatte. Bolte & Eikelboom (2012) analysierten Personen-Exposimeter-Daten im Rahmen von 24h-Messungen von 98 Personen im Alter zwischen 19 und 81 Jahren, die während 39 alltäglichen Aktivitäten aufgezeichnet wurden. Obwohl die Exposition von Schnurlostelefonen während der meisten häuslichen Aktivitäten den höchsten Beitrag zur Gesamtexposition lieferte, war während des Schlafes die Wi-Fi-Exposition am höchsten. Markakis & Samaras (2013) berichteten ebenfalls, dass im Tagesverlauf die Wi-Fi-Exposition in der Nacht sowohl in der häuslichen Umgebung insgesamt sowie speziell in Schlafzimmern am höchsten war.

Aus einer Eurobarometerumfrage aus dem Jahr 2010 geht hervor, dass ein Teil der Bevölkerung wegen möglicher gesundheitlicher Konsequenzen infolge einer Hochfrequenzexposition durch mobile Kommunikationssysteme besorgt ist. Dies gilt insbesondere für Mobiltelefone und Basisstationen (TNS Opinion & Social, 2010). Auf der Symptomebene gehören Beeinträchtigungen des Schlafes zu dem am häufigsten beklagten Beschwerden (Huss et al., 2004; Roosli et al., 2004). Ein möglicher Einfluss von Hochfrequenzexposition (im Wesentlichen durch Mobiltelefonnutzung) auf objektive Schlafparameter wurde in verschiedenen experimentellen Humanstudien (Provokationsstudien) untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien waren jedoch sehr inhomogen. Für eine zusammenfassende Darstellung sei auf Danker-Hopfe et al. (2016) verwiesen. Speziell für die mögliche Auswirkung einer Wi-Fi-Exposition auf den Schlaf liegen weder auf Symptomebene noch auf der Ebene objektiver Messungen Daten vor. Es gibt jedoch eine ganze Reihe von Kommentaren und Postings sowie anekdotische Evidenz im Internet, die nahelegen, dass eine Wi-Fi-Exposition die Gesundheit in gleicher Weise beeinträchtigen könnte wie eine Hochfrequenzexposition ausgehend von anderen Quellen. So publiziert zum Beispiel die Nonprofit Organisation Environmental Health Trust Strategien zur Reduktion der Exposition in Schlafzimmern. Dort wird angenommen, dass sich die Anwendung dieser Strategien positiv auf den Schlaf in der Nacht auswirkt. So wird u.a. das Abschalten des Wi-Fi-Routers in der Nacht empfohlen, ebenso die Vermeidung der Platzierung des Routers und anderer elektrischer Geräte in der Näher des Schlafplatzes (Internetseite: https://ehtrust.org/five-strategies-improving-sleep/; Letzter Zugriff auf die Seite am 14.04.2020).

Neben der Erholungs- und Regenerationsfunktion von Körper und Gehirn wird die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten ebenfalls als eine wichtige Funktion des Schlafes angesehen. Dabei hat sich im Laufe der Zeit gezeigt, dass den verschiedenen Schlafstadien möglicherweise unterschiedliche Funktionen bei der Gedächtniskonsolidierung zugeschrieben werden können: deklarative Gedächtnisinhalte werden eher im Tiefschlaf und prozedurale sowie emotionale Gedächtnisinhalte eher im REM-Schlaf konsolidiert. Auf physiologischer Ebene scheinen bei der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung die langsamen Oszillationen des Tiefschlafs sowie die überwiegend im Schlafstadium N2 auftretenden Schlafspindeln eine besondere Rolle zu spielen (Diekelmann & Born 2010, Rasch & Born 2013, Walker 2010).

Zum Einfluss hochfrequenter Felder auf die Gedächtniskonsolidierung im Schlaf liegt bisher erst eine (Schweizer) Studie vor. In dieser Studie von Lustenberger et al. (2013) wurde an 16 jungen männlichen Testpersonen überprüft, ob ein experimentelles Mobilfunksignal, welches so gewählt wurde, dass es mit der Wiederholungsfrequenz von Schlafspindeln (0,25 Hz) und langsamen Oszillationen (0,8 Hz) im Einklang ist, genau diese Hirnaktivitäten modulieren kann und somit Auswirkungen auf die Konsolidierung zuvor gelernter Gedächtnisinhalte hat. Im Vergleich zu der Sham-Bedingung führte das Hochfrequenzsignal gegen Ende der Nacht zu Veränderungen der Hirnaktivität in Form einer Erhöhung der spektralen Leistung (Power) im Frequenzbereich langsamer Oszillationen. Die Schlafspindelaktivität war hingegen nicht von der Exposition betroffen. Auf der Verhaltensebene zeigte sich, dass die Verbesserung in einer motorischen Lernaufgabe über Nacht unter der Exposition geringer ausgefallen war als unter der Sham-Bedingung. Aus diesen Ergebnissen wurde geschlussfolgert, dass auch ein Hochfrequenzsignal Einfluss auf Hirnaktivitäten im Schlaf nehmen und somit Veränderungen der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung hervorrufen kann.

Unabhängig vom Schlaf gibt es bisher insgesamt überhaupt nur sehr wenige Studien, die einen möglichen Einfluss von Wi-Fi-Exposition auf die elektrophysiologische Aktivität des Gehirns und/oder neurokognitive Funktionen untersucht haben. Eine Zusammenfassung der Studien, die bis zum Jahr 2013 publiziert wurden, ist bei Foster & Moulder (2013) zu finden.

So haben z.B. Papageorgiou et al. (2011) Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition (2,45 GHz) auf die P300-Komponente eines ereigniskorrelierten Potentials durchgeführt. Je 15 Männer und Frauen absolvierten einmal mit und einmal ohne Exposition den „Hayling Satzvervollständigungstest“, der sich aus drei unterschiedlichen Teilaufgaben zusammensetzte (Reaktions-Aktivierung, Reaktions-Hemmung, Grundlinien-Bedingung). An 15 von 18 Elektroden zeigte sich für das Reaktions-Hemmungs-Paradigma ein signifikanter Wechselwirkungseffekt von Geschlecht und Exposition. Unter der Sham Bedingung war bei Männern eine größere P300-Amplitude zu

beobachten als bei Frauen, der Unterschied war statistisch jedoch nicht signifikant. Unter Wi-Fi-Exposition verringerte sich die P300-Amplitude bei Männern, während sie bei Frauen größer wurde, was zu einer statistisch signifikant geringeren Amplitude unter Wi-Fi-Exposition bei Männern im Vergleich zu Frauen führte.

In einer neueren Studie von Zentai und Kollegen (Zentai et al., 2015) wurde überprüft, ob eine 60-minütige Wi-Fi-Exposition (2,45 GHz) einen Einfluss auf das Elektroenzephalogramm (EEG) im Wachzustand unter Ruhe-Bedingungen (Ruhe-EEG) hat (n=25; 15 Frauen; mittleres Alter ± Standardfehler: 23,3 ± 0,6 Jahre) und ob durch die Exposition die Daueraufmerksamkeit beeinflusst wird (n=19; 10 Frauen; mittleres Alter ± Standardfehler: 21,0 ± 0,4 Jahre). Es konnte weder ein Expositionseffekt auf die EEG-Power im Ruhe-EEG noch auf die Reaktionszeiten in einem psychomotorischen Vigilanztest gefunden werden.

Bamdad et al. (2019) haben eine Studie zum Effekt einer retrospektiv erfragten Wi-Fi-Nutzung (Parallelgruppen wurde auf der Basis der Nutzung definiert) auf die Ergebnisse in kognitiven Tests bei 312 Teenagern im Alter von 14 17 Jahren durchgeführt. Auf eine Ausführung der Ergebnisse wird verzichtet, da die Studie nicht den Qualitätsanforderungen in diesem Forschungsfeld entspricht.

In einer Studie von Hosseini et al. (2019) wurde die Wirkung einer kurzzeitigen Wi-Fi-Exposition auf kognitive Funktionen beobachtet. 45 Universitätsstudenten (32 Frauen; mittleres Alter ± Standardabweichung: 28,3 ± 5,7 Jahre) haben sich freiwillig für die Teilnahme an dieser Studie gemeldet. Bevor die Probanden*Innen Tests zur Reaktionszeit, zum Kurzzeitgedächtnis und zum Denkvermögen absolvieren mussten, erfolgte entweder eine Schein- oder Verumexposition für jeweils 120 Minuten. Alle Probanden*Innen haben beide Expositionsbedingungen durchlaufen. Die Ergebnisse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten unter der Schein- und unter der Verumexpositionsbedingung. Zu dieser Studie ist anzumerken, dass die Angaben bzw. Berechnungen zur Exposition fehlerhaft sind.

III Zielsetzung

Das Forschungsprojekt hatte zwei Ziele. Zum einen sollte unter der Annahme, dass die Besorgnis hinsichtlich einer Wi-Fi-Exposition ähnlich ausgeprägt ist wie bei Mobiltelefonie, und unter dem Aspekt, dass Wi-Fi in der Nacht stärker zur Gesamtexposition beiträgt als am Tag, mit statistisch belastbaren Ergebnissen die Frage beantwortet werden, ob hochfrequente elektromagnetische Felder, die von WLAN-Access Points ausgehen, einen Einfluss auf den Schlaf haben. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund bedeutsam, dass sich solche WLAN-Access Points häufig in bzw. in unmittelbarer Nähe von Schlafzimmern befinden, was Befürchtungen zu gesundheitlichen Risiken durch hochfrequente elektromagnetische Felder verstärken kann. Unseres Wissens ist dies die erste Studie, in der folgende Effekte untersucht werden: Hat eine über die gesamte Nacht andauernde Wi-Fi-Exposition einen Einfluss auf (1) die subjektive Schlafqualität, (2) die Makrostruktur des Schlafes (d.h. auf Parameter zur Charakterisierung der Schlaf-Wachzeiten, der Latenzen, der Schlafarchitektur und der Schlafkontinuität) und (3) die Mikrostruktur des Schlafes (Arousal und Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs). Einflüsse anderer Hochfrequenzexpositionen (u.a. GSM 900, GSM 1800, UMTS) sind bereits untersucht worden und mehrfach wurden dabei Effekte insbesondere auf die Mikrostruktur des Schlafes beobachtet. In diesem Zusammenhang kann die vorliegende Untersuchung belastbare Ergebnisse für die Kommunikation mit Bürgerinnen und Bürgern sowie für Diskussionen politischer Entscheidungsträger liefern.

Zum anderen greift das Forschungsprojekt einen bisher im Zusammenhang mit Hochfrequenzexposition wenig untersuchten Aspekt auf. Zu den wiederholt berichteten Befunden zählt eine Veränderung der Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs, insbesondere im Schlafspindelfrequenzbereich (SCENIHR 2015). Da diese EEG-Muster im Zusammenspiel mit den langsamen Oszillationen maßgeblich an der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung beteiligt sind, lag es nahe zu untersuchen, ob auch eine über die gesamte Nacht angewendete Wi-Fi-Exposition (4) zu einer Veränderung der Powerspektralwerte in diesen Frequenzbereichen führt und (5) falls dieses zutrifft, ob das mit Veränderungen in der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung in Zusammenhang gebracht werden kann.

IV Design der Studie

Probanden, die ihr Interesse an einer Studienteilnahme bekundet haben, mussten zunächst ein umfangreiches Screening durchlaufen, um an der Studie teilnehmen zu können. Das Screening umfasste mehrere Stufen (Telefoninterview, Fragebögen, medizinische Untersuchung, Screeningnacht im Labor), in denen alle relevanten Ein- und Ausschlusskriterien geprüft wurden. Detaillierte Informationen zur Probandenrekrutierung und zum Screening finden sich in Kap. VII.

Waren die Einschlusskriterien soweit erfüllt und lagen keine Ausschlusskriterien vor, verbrachten die Probanden zur Eingewöhnung sowie zum Ausschluss von Schlafstörungen eine Adaptationsnacht in unserem Schlaflabor. Zeigten die Probanden keine Auffälligkeiten, wurden sie eingeschlossen.

Insgesamt folgten zwei gepaarte Studiennächte im Labor, von denen die jeweils erste eine Baselinenacht (ohne Exposition und Durchführung von Tests) und die zweite eine Messnacht mit entweder Sham- oder Verum-Exposition war, wobei die Expositionsbedingungen balanciert randomisiert unter Wahrung von Doppelblindheit zugeordnet wurden. Die Durchführung der gepaarten Nächte erfolgte in der Regel in einem zeitlichen Abstand von einer Woche (Abb. IV.1).

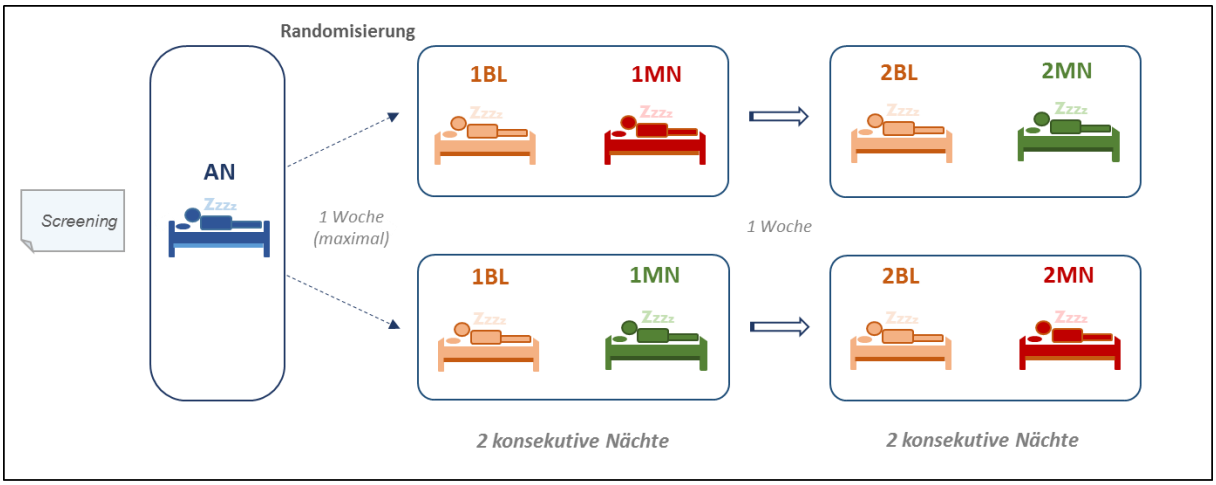


Abb. IV.1: Studiendesign. Nach der Screeningphase inklusive Adapatations-/Screeningnacht verbrachten die Studienteilnehmer zwei Baselinenächte jeweils gefolgt von einer Messnacht mit Sham- bzw. Verum-Exposition im Labor. Der Abstand zwischen den jeweils zwei konsekutiven Nächten betrug eine Woche.

Ein möglicher Einfluss von Wi-Fi-Exposition wurde mit zwei unterschiedlichen Expositionsbedingungen untersucht: a) Scheinexposition mit einem Teilkörper SAR-Wert (über 10 g gemittelt) von 0 mW/kg und b) Wi-Fi-Exposition mit einem Teilkörper SAR-Wert (über 10 g gemittelt) von max. 25 mW/kg (im Hirngewebe max. 5 mW/kg). Über die Zeit gemittelt wurde ein Teilkörper-SAR-Wert von max.

6,4 mW/kg erreicht (im Hirngewebe max. 1,3 mW/kg). Dies entspricht einem Szenario mit maximaler realistischer Exposition beim Gebrauch von WLAN im häuslichen Umfeld. Da die Probanden in der Regel jeweils an den gleichen Wochentagen bzw. –nächten zur Untersuchung ins Labor kamen, ist eine aus unterschiedlichen Wochentagen resultierende Variabilität in den Daten minimiert worden. Über die gesamte Dauer der Studienteilnahme wurde außerdem der Schlaf-Wach-Rhythmus der Teilnehmer mittels Aktigraphie (Actiwatch Spectrum Plus®, Respironics Inc, Murrysville, USA) kontrolliert.

Direkt nach Ankunft der Studienteilnehmer im Labor gegen 18:00 Uhr wurde ein Alkoholtest durchgeführt. War dieser negativ, wurden alle Elektroden und Messfühler, die zur Erfassung der vorgesehenen Biosignale notwendig sind, auf dem Kopf und am Körper positioniert. Zuvor wurde bei Baseline- und Messnächten der Aktigraph entgegengenommen, die Daten wurden ausgelesen und gespeichert. Es folgte das Ausfüllen von Fragebögen. In der Adaptations-/Screeningnacht sowie in den Baselinenächten sollten die Probanden vor dem Zubettgehen für ca. 1 Stunde lesen. In der entsprechenden Zeit (ca. 21:00 Uhr bis 22:00 Uhr) fand in den Messnächten die Lernphase der Gedächtnistests statt und die Kontrolltests wurden durchgeführt. Vor dem Zubettgehen wurde in jeder Nacht das Abendprotokoll ausgefüllt, in den Baseline- und Messnächten wurde unmittelbar vor dem Löschen des Lichts einer Speichelprobe gesammelt. Nach dem „Licht aus“ gegen 23:00 Uhr erfolgte dann (nur in den Messnächten) die Exposition (Sham oder Verum) über die gesamte Dauer der Nacht (acht Stunden). Unmittelbar nach dem „Licht an“ um 07:00 Uhr wurde erneut eine Speichelprobe gesammelt und das Morgenprotokoll wurde ausgefüllt. Gegen 07:30 Uhr erfolgte in den Messnächten die Abfrage zu den Gedächtnisaufgaben. Vor dem Entfernen der Elektroden wurden in allen Nächten nochmals Fragebögen ausgefüllt. Im Anschluss an das Entfernen aller Elektroden wurde außer nach der letzten Messnacht der neu konfigurierte Aktigraph wieder ausgegeben. Die Probanden erhielten ein Frühstück und konnten das Labor verlassen.

Eine schematische Darstellung der Abläufe in der Adaptationsnacht, in den Baselinenächten und den Messnächten findet sich in Abb. IV.2. Eine tabellarische Übersicht über die im Screening eingesetzten Verfahren sowie die zu den jeweiligen Nächten durchgeführten Assessments finden sich in Tab. IV.1.

Für die Studie liegt ein positives Ethikvotum (datiert vom 03.05.2017) der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin vor (EA4/071/17). In einem Amendment wurde der Erhebung von Speichelproben zum Zweck der Bestimmung von Steroidhormonen, insbesondere der Bestimmung von Cortisol, zugestimmt (21.03.2018). Da eine Analyse der Speichelproben nicht im Kostenbudget des Projekts vorgesehen war, erfolgt diese Auswertung zu einem späteren Zeitpunkt. Alle Untersuchungen wurden in Übereinstimmung mit den Ethischen Grundsätzen für die medizinische Forschung am Menschen (Deklaration von Helsinki, revidierte Version vom Oktober 2000 - Edinburgh) durchgeführt.

Tab. IV.1: Assessments während des Screenings, der Baseline- (BL) und Messnächte (MN).

	RE	**AN**			**BL 1**		**MN 1**			**BL 2**		**MN 2**	
	Screening	1. Nacht			2. Nacht		**3. Nacht**			4. Nacht		**5. Nacht**	
		A	M		A	M	A	M		A	M	A	M
Telefongespräch	X												
Screening - FB:													
ESS	X												
PSQI	X												
PHQ-9	X												
PHQ-15	X												
MAB	X												
ASF	X												
UW	X												
Schlaftagebuch	X												
Einwilligungs-erklärung + med. Untersuchung	X												
ambulantes Apnoescreening	X												
Aktigraphie			X	X		X		X	X		X		
Alkoholtest		X			X		X			X		X	
Abendprotokoll		X			X		X			X		X	
Speichelprobe					X	X	X	X		X	X	X	X
Polysomnographie		X			X		X			X		X	
Morgenprotokoll			X			X		X			X		X
Kontroll – FB:													
PANAS		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
VAS		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
STAI		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
GBB-24		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
Kontrolltests:													
DST							X	X				X	X
RWT							X	X				X	X
Lernaufgaben:													
WPT							X	X				X	X
FRT							X	X				X	X
SFTT							X	X				X	X

1 Woche (maximal) — *1 Woche*

RE = Rekrutierung; AN = Adaptationsnacht; BL = Baselinenacht; MN = Messnacht; A = Abend; M = Morgen; FB = Fragebögen; ESS = Epworth Schläfrigkeitsskala; PSQI = Pittsburgh Schlafqualitäts-Index; PHQ 9 = Patient Health Questionnaire zu depressiver Symptomatik; PHQ 15 = Patient Health Questionnaire zu somatischer Symptomatik; MAB = Fragebogen zur Bestimmung des Morgen-Abendtyps; ASF = Allgemeiner Schlaffragebogen; UW = Umweltfaktoren und WLAN; PANAS = Positive and Negative Affect Schedule; VAS = Visuelle Analogskalen; STAI = State-Trait-Angstinventar; GBB-24 = Gießener Beschwerdebogen; DST = Digit Span Test; RWT = Regensburger Wortflüssigkeitstest; WPT = Word pair test; FRT = Face recognition test; SFTT = Sequential finger tapping test.

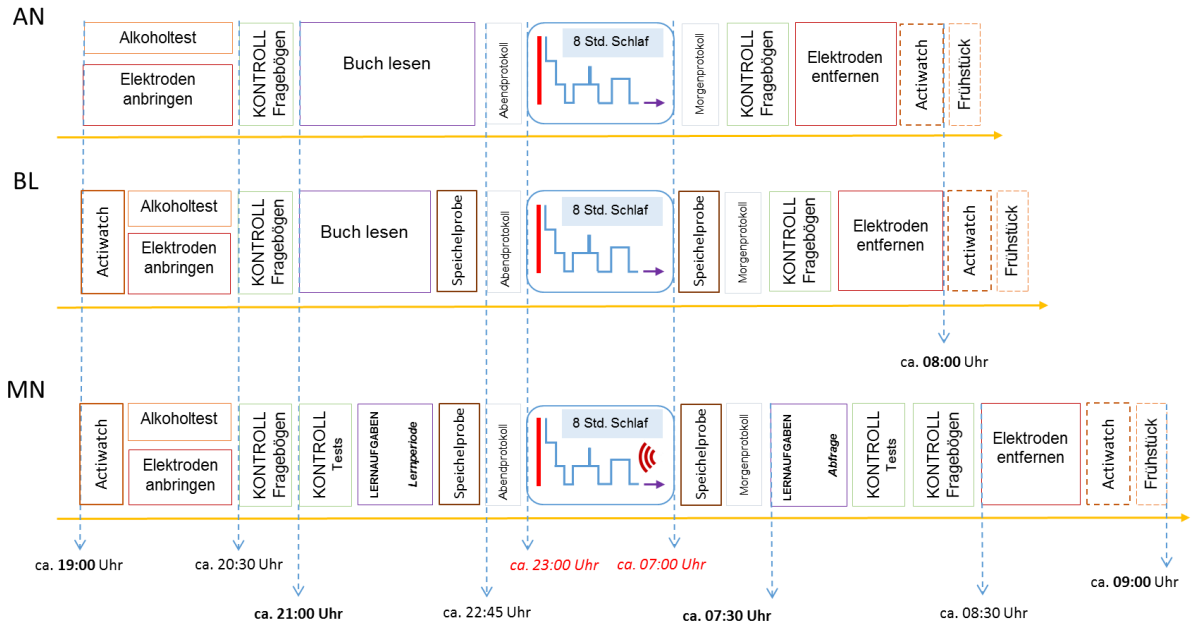


Abb. IV.2: Schematische Darstellung des Ablaufs der Screeningnacht (AN), der Baselinenächte (BL) sowie der Nächte mit Exposition (MN). Erneute Ausgabe des Aktigraphen nur nach MN1; WPT= Word Pair Test; FRT= Face Recognition Test; SFTT= Sequential FingerTapping Test.

Die Probanden erhielten für das komplette Durchlaufen der Studie eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 350 €. Die Entschädigung wurde gestaffelt ausgezahlt (siehe Tab. IV.2).

Tab. IV.2: Gestaffelte Auszahlung der Aufwandsentschädigung. (AN= Adaptations- und Screeningnacht, BL = Baselinenacht, MN = Expositionsnacht).

Aufwandsentschädigung für	Betrag
medizinische Voruntersuchung	25 €
Screeningnacht (AN)	30 €
Nacht 2 (BL 1)	50 €
Nacht 3 (MN 1)	60 €
Nacht 4 (BL 2)	70 €
Nacht 5 (MN 2)	115 €
Summe	**350 €**

V Einrichtung der Laborumgebung

Die für die experimentellen Untersuchungen benutzte Expositionsanlage wurde durch die Seibersdorf Labor GmbH in Abstimmung mit der Studienleitung entwickelt. Die Überwachung der Anlage erfolgte unabhängig vom Studienteam durch die Seibersdorf Labor GmbH. Die Beschreibung der Expositionsanlage und die detaillierte dosimetrische Analyse finden sich im Report *Entwicklung einer Expositionsanlage für eine Probandenstudie mit Exposition durch WLAN-Funksignale im 2.45 GHz Band*, der von Schmid, Hirtl und Überacher angefertigt wurde und zusammen mit dem Zwischenbericht zur Studie übermittelt worden ist (siehe auch Schmid et al. (2020)).

V.1 Gestaltung des Messraums

Die experimentellen Untersuchungen wurden in einem gegenüber elektromagnetischen Feldern abgeschirmten Raum durchgeführt. Die Abschirmung wurde durch Aluminiumblech innerhalb des Wand- / Decken- und Fußbodenaufbaus erreicht. Dies ist nicht augenscheinlich erkennbar. Der Raum ist wohnlich gestaltet und gleicht aus Sicht der Versuchspersonen anderen Schlaflaboren. Sämtliche 230 V-Leitungen und haustechnische Signalleitungen wurden über Hochfrequenzfilter in den Raum geführt, Kabelverbindungen für die Experimente wurden zur Dämpfung äußerer Hochfrequenzsignale in Metallrohren zur Wanddurchführung mit Ferritringen ausgestattet. Weiterhin wurden zur Minimierung elektrischer Wechselfelder vom Stromversorgungsnetz 230 V-Leitungen im Raum abgeschirmt ausgeführt. Die Effektivität der Maßnahmen wurde durch die Messung der Hintergrundfelder dokumentiert. Die elektromagnetischen Hintergrundimmissionen in dem geschirmten Probandenraum (Raumnummer: 5011-1510) wurden gemessen. Die Ergebnisse sind dem Kapitel 5 des Reports vom Kooperationspartner Seibersdorf Laboratories GmbH zu entnehmen.

Zur Ausstattung des Untersuchungsraums für die Experimente wurden ausschließlich Holzmöbel verwendet. Dies minimiert Änderungen der Antenneneigenschaften bzw. der Hochfrequenz-Feldverteilung.

Für gleichbleibende und von Jahres- und Tageszeit unabhängige Untersuchungsbedingungen war der Messraum klimatisiert und vom äußeren Tageslicht getrennt. Für die Durchführung der Tests war konstant eine Deckenbeleuchtung eingeschaltet, die im Bereich der Versuchspersonen eine Beleuchtungsstärke von 600 bis 1000 lx erzeugt.

V.2 Technische Bedingungen für den Messplatz

Funktechnische Geräte können bei verschiedensten elektronischen Geräten in der Umgebung deutlich wahrnehmbare Störungen verursachen. Vergleichbare Wirkungen können auch die von der Expositionsanlage abgestrahlten Testsignale haben. Effekte dieser Art würden die Blindheit einer Studie dieser Art verletzen. Deshalb waren folgende Maßnahmen erforderlich:

- Verzicht auf alle nicht notwendigen elektronischen Geräte, d.h. Mobiltelefone, Tonwiedergabegeräte (Radios, MP3-Player etc.), Computer, Organizer, Taschenrechner, elektronische Uhren etc. Diese durften nicht mit in den Untersuchungsraum hineingenommen werden.
- Auswahl bzw. Modifikation der in den Räumen erforderlichen elektronischen Geräte: Wechselsprechanlage und Polygraphie-Aufzeichnungsgerät.

Störungen, die das Polysomnographiegerät zeigt, hätten ebenfalls die Blindheit, vor allem auf Seiten der Untersucher, verletzt. Außerdem könnten sie die Studienergebnisse direkt beeinflussen. Die zur Vermeidung solcher Störungen ergriffenen Maßnahmen werden im folgenden Abschnitt näher ausgeführt.

V.3 Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität bei EEG-Ableitung unter Exposition

Um gegenseitigen Beeinflussungen der Registrierung der biologischen Signale und der Exposition mit dem Hochfrequenz-Signal am Kopf vorzubeugen, war die Entwicklung spezieller Erweiterungen der Registriergeräte (Filter und Abschirmungen) und von neuartigen EEG-Elektrodenkabeln erforderlich.

Modulierte Hochfrequenzsignale erzeugen in den empfindlichen EEG-Vorverstärkern niederfrequente Störungen, da die Halbleiterbauelemente der EEG-Vorverstärker durch ihre Nichtlinearitäten die Signale demodulieren. Die Störsignale können direkt oder auch durch Alias-Effekte in Frequenzbereichen der gemessenen Biosignale erscheinen und somit einerseits die Blindheit der Studiendurchführung stören und andererseits direkt die Ergebnisse der Auswertung in Studien wie der vorliegenden beeinflussen. Diese Störmöglichkeit muss in erster Linie an der Quelle minimiert werden. Im vorliegenden Projekt wurde für die EEG-Eingangsbox, die den Verstärker und den Analog-Digital-Wandler beinhaltet, ein Aluminiumabschirmgehäuse mit einem dicht verschraubbaren Deckel angefertigt. Die Kleinspannungs-Stromversorgungsleitungen sowie die Ethernet-Signalleitungen der Geräte wurden durch Ferritringe in Abschirmkammern geführt.

Die Signalübertragung für Markersignale (Synchronisation zwischen dem zeitlichen Ablauf der psychometrischen Tests und der EEG-Aufzeichnung) erfolgte über Kunststofflichtleiter.

Sämtliche Polygraphiesignale wurden über LC-Tiefpassfilter 5. Ordnung geführt. Die Filter wurden mit keramischen Kondensatorarrays und Ferritplatten in Abschirmkammern realisiert (siehe Abb. V.1).

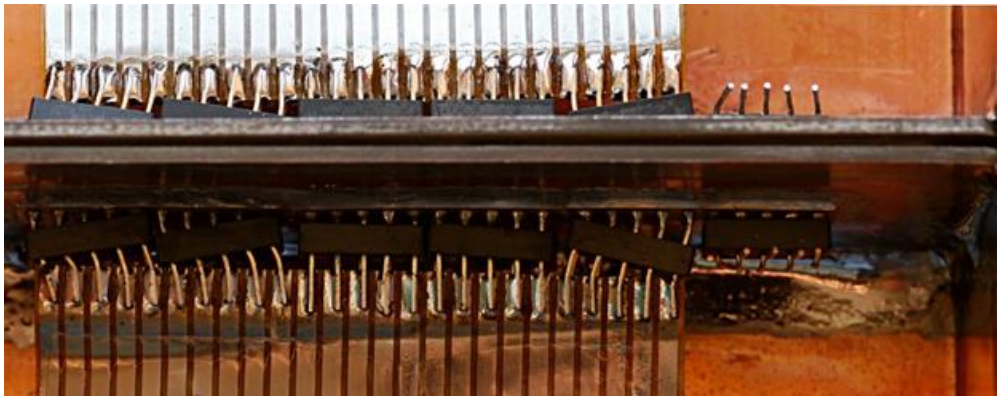


Abb. V.1: Tiefpassfilter für EEG-Polysomnographieeingänge des Registriergerätes.

EEG-Kabel und Elektroden, die am Kopf leitend befestigt sind, führen zu zwei Beeinträchtigungen bei der Messung von EEG während gleichzeitiger Exposition mit elektromagnetischen Feldern:

1. die Kabel reduzieren Hochfrequenzfeldstärken parallel zur Kopfoberfläche infolge ihrer Eigenschaft als Leiter,
2. unter den Elektroden ändern sich lokal die Feldstärken durch Hochfrequenzstromflüsse in den Elektrodenkabeln.

Beide Effekte lassen sich minimieren, indem die Leitfähigkeit der Kabel für die Hochfrequenzströme reduziert wird. Dafür kommen grundsätzlich resistive und induktive Impedanzen infrage. Da Ohmsche Widerstände (resistiv) zusätzliche EEG-Artefakte durch andere Quellen begünstigen, wurden Kabel verwendet, die auf ihrer gesamten Länge Induktivitätsbelag aufweisen (gewendelte Leiter). Die Herstellung erfolgte, indem Wendelfedern aus nichtrostendem Stahl mit Polyolefin-Schrumpfschlauch überzogen wurden (siehe Abb. V.2). Die Umhüllung sorgt für angenehmen Tragekomfort und einfache Handhabbarkeit. Der Ohmsche Widerstand des Stahldrahtes (etwa 400 Ohm für ein gesamtes Elektrodenkabel) trägt weiter zur Hochfrequenzdämpfung bei, beeinfusst aber die Impedanz für die Messung der EEG-Signale nicht wesentlich.

Abb. V.2: Elektrodenkabel mit Induktivitätsbelag.

V.4 Überprüfung der Polysomnographie-Aufzeichnungen auf Störungen

Modulierte Hochfrequenzsignale können durch ihre Einwirkung auf elektronische Schaltungen bei polygrafischen Aufzeichnungen Störungen erzeugen, die ihrerseits Signalparameter beeinflussen und auf diese Weise zu Unterschieden zwischen Ergebnissen für Exposition und Nichtexposition führen und damit biologische Effekte der Hochfrequenzsignale vortäuschen. Durch die in Kap. V.3 beschriebenen Maßnahmen wurde versucht, solche Einwirkungen so weit als möglich zu unterdrücken. Zur Überprüfung, inwieweit noch immer von der Exposition abhängige technische Artefakte in der Aufzeichnung entstanden waren, wurden Messungen mit einer Wassermelone als Träger der Kopfelektroden durchgeführt. Die Frucht ist ein einfaches elektrisches Modell für den menschlichen Kopf und leicht handhabbar. Präparation und Applikation von Elektroden geschah auf analoge Weise wie am menschlichen Kopf (Abb. V.3).

Es wurde einmal unter Wi-Fi-Exposition, sowie zweimal unter der Sham-Bedingung aufgezeichnet. Die Melone war mit dem EEG-Gerät verbunden, wurde für die Messungen einmalig entsprechend der Kopflage von Probanden auf dem Bett positioniert und wurde nicht bewegt. Die Aufzeichnungsdauer betrug jeweils mindestens 40 Minuten.

Von den Aufzeichnungen wurden Leistungsspektren entsprechend der für die Datenauswertung der Studie vorgesehenen Verfahrensweise berechnet und für weitere Analysen über Abschnitte von je drei Minuten gemittelt. Die Frequenzauflösung beträgt 0,25 Hz. Start- und End-Abschnitte von je 30 s

blieben zum Ausschluss evtl. Einschwingvorgänge des EEG-Gerätes unbenutzt. In die Auswertung gingen damit für jede Expositionsbedingung 13 gemittelte Spektren für jede der 19 Lokalisationen ein.

Abb. V.3: Melone mit Kopf-Elektroden.

Die mit der Melone aufgezeichneten Signale bestehen aus dem Rauschen des EEG-Gerätes und elektrochemisch-physikalischen Elektrodenartefakten. Diese Signale sind sehr schwach. Die sich ergebenden Powerspektralwerte liegen im Mittel um zwei Größenordnungen niedriger als bei EEG-Aufzeichnungen von Versuchspersonen. Somit wären etwaige expositionsbedingte Störungen relativ zu den sonstigen Signalen entsprechend stärker, d.h. die Analyse der Aufzeichnungen mit der Melone ist deutlich empfindlicher für derartige Störungen, als es die tatsächliche Auswertung der Studie sein würde.

Gemittelte Powerspektren über alle Abschnitte der Aufzeichnung unter Wi-Fi-Exposition und der zeitlich danach erstellten Aufzeichnung unter Sham wurden für alle 19 Lokalisationen dargestellt. Es gab hier keine systematischen Unterschiede. Exemplarisch ist in Abb. V.4 der Vergleich für die Lokalisation T3 gezeigt.

Das 50 Hz Störsignal vom Stromnetz ist bei der hier vorliegenden Frequenzauflösung zweieinhalb Größenordnungen stärker als das Rauschen. Erhöhte Spektralwerte unter Wi-Fi-Exposition sind nicht zu beobachten.

Bei natürlichen Zufallssignalen sind nicht nur die Augenblickswerte, sondern auch die Spektren zeitlichen Veränderungen unterworfen. Nacheinander erhobene Messwerte (unter unterschiedlichen oder auch unter gleichen Bedingungen) weichen dadurch voneinander ab. Für die Melonenmessungen wurden die Messwerte mit verschiedenen weiteren Ansätzen verglichen, die hier nicht beschrieben

wurden. Eine systematische Erhöhung von Powerspektralwerten, wie sie bei einer Störung durch Wi-Fi-Signale auftreten würde, wurde nicht festgestellt.

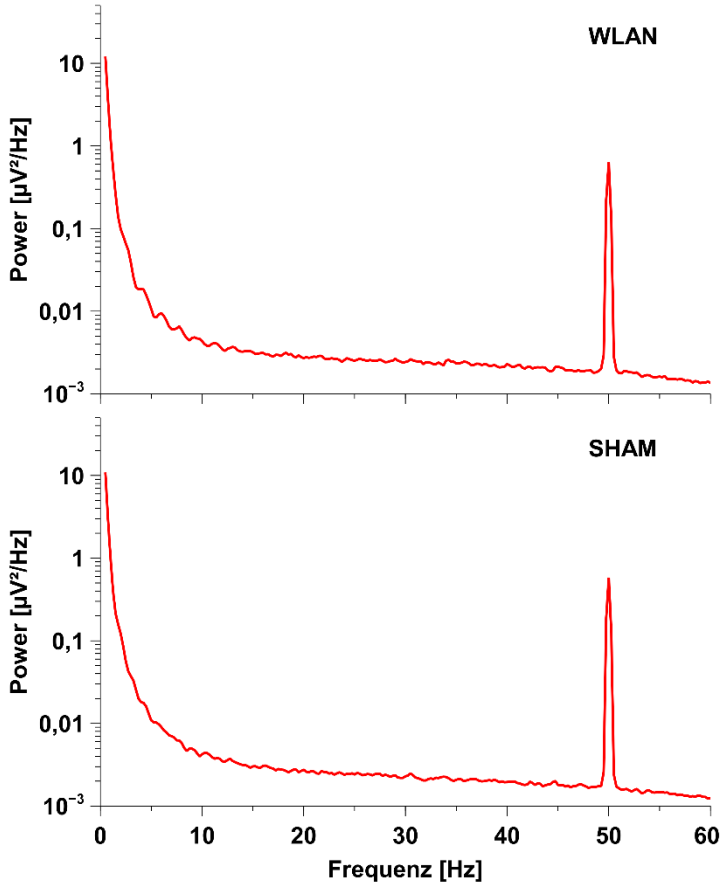


Abb. V.4: Powerspektren der Melonenaufzeichnung, Lokalisation T3.

VI Bericht zum Aufbau einer Expositionseinrichtung

Zur Entwicklung einer Expositionsanlage für eine Probandenstudie mit Exposition durch WLAN-Funksignale im 2,45 GHz Band wurde von den Kollegen Schmid, Hirtl und Überacher vom Kooperationspartner Seibersdorf Laboratories GmbH ein getrennter Report vorgelegt (siehe auch Schmid et al. (2020)).

VII Probanden

VII.1 Überlegungen zur Stichprobengröße

Um in klinischen Studien die Wirksamkeit einer Intervention nachweisen zu können, muss im Vorfeld der Studie eine Fallzahlkalkulation durchgeführt werden. Sie ist ein entscheidender Faktor bei der Studienplanung und stellt ein Qualitätskriterium einer Studie dar. Es soll dadurch a priori sichergestellt werden, dass die zu rekrutierende Stichprobengröße ausreichend ist, um einen tatsächlich vorhandenen Effekt bzw. einen tatsächlich nicht vorhandenen Effekt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auch als einen solchen erkennen zu können. Für die Berechnung werden neben einer Entscheidung bezüglich der Art des verwendeten statistischen Tests (inklusive der Dimensionalität, d.h. einseitiges vs. zweiseitiges Testproblem) noch Angaben zur Größe des zu erwartenden Effekts, zum Fehler 1. Art (= α; Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen wird oder auch Irrtumswahrscheinlichkeit) und zur Teststärke (= Wahrscheinlichkeit, dass die Ablehnung der Nullhypothese korrekt ist oder auch Power) benötigt. Die Power errechnet sich aus 1 – β, wobei β den Fehler 2. Art darstellt (= Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese beibehalten wird, obwohl sie nicht korrekt ist). Bei den Überlegungen zur Festlegung dieser Angaben gilt es folgende Zusammenhänge zu beachten: (1) Je größer die gewählte Power, desto größer auch die Fallzahl, da nur so der Fehler 2. Art gering gehalten werden kann; (2) Je kleiner die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit, desto größer die Fallzahl; (3) Je kleiner der Effektgrößenschätzer, desto größer die Fallzahl; (4) Bei der Anwendung von nonparametrischen Testverfahren (= es liegt keine Normalverteilungs-annahme der zu untersuchenden Daten zugrunde) ist die benötigte Fallzahl größer als bei parametrischen Tests (= es liegt eine Normalverteilungsannahme der zu untersuchenden Daten zugrunde); (5) Bei einem zweiseitigen Testproblem (= ungerichtete Hypothese) ist die Fallzahl größer als bei einem einseitigen Testproblem (= gerichtete Hypothese); (6) Ein Parallelgruppen-Studiendesign erfordert eine größere Fallzahl als ein Crossover-Studiendesign, da bei letzterem jeder Proband als seine eigene Kontrolle dient und somit die Varianz bedingt durch die interindividuelle Variabilität minimiert wird. Diese Beziehungen lassen sich leicht mittels validierter Fallzahlkalkulationsprogramme, wie z.B. dem kostenlos im Internet zur Verfügung gestellten *G*Power 3* (Universität Düsseldorf o. J.), nachweisen. Es ist jedoch wichtig, zu erwähnen, dass die Anwendung derartiger Programme nur mit statistischem Grundwissen erfolgen sollte (s.u.). Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass bei dem Versuch, mit größtmöglicher Sicherheit selbst kleinste Effekte belastbar nachweisen zu wollen, Stichprobengrößen schnell ins Unermessliche ansteigen können. Entsprechend ist es also absolut notwendig, sich im Vorfeld einer Studie umfangreiche Gedanken über diese Parameter zu machen, damit die Studiendurchführung auch aus ökonomischer und aus ethischer Sicht noch gerechtfertigt bleibt (Rohrig et al., 2010).

Üblicherweise wird die Irrtumswahrscheinlichkeit bei einem zweiseitigen Testproblem auf 5 % gesetzt und die Power beträgt mindestens 80 %. Abschätzungen zur Effektgröße lassen sich in der Regel entweder direkt aus der Literatur bzw. aus Pilotstudien ableiten oder sind so zu wählen, dass klinisch relevante Effekte erkannt werden können. Sie sollten sich immer auf eine Zielvariable beziehen, die dem primären Endpunkt einer Studie zuzuordnen ist. Im Allgemeinen werden Effektgrößen als dimensionsloses Maß angegeben. Die Frage, ab welcher Größe ein Effekt klinisch relevant ist, ist nicht einfach zu beantworten, da eindeutige Regeln für eine Bewertung von Effekten nicht existieren. Cohen (1988) hat zwar eine Orientierungshilfe vorgeschlagen, die mittlerweile in der Wissenschaft allgemein anerkannt ist (Klassifizierung nach kleinen, mittleren und großen Effekten). Doch auch diese Interpretationshilfe ist für die eindeutige Klärung von Relevanz nicht ausreichend. Denn je nach Fragestellung und/oder Forschungsbereich können einerseits große Effekte als wenig aussagekräftig betrachtet werden, andererseits kann aber auch ein kleiner Effekt manchmal als äußerst wichtig eingestuft werden (Rosenthal, 1993). Letztendlich kann diese Frage also nicht statistisch beantwortet werden, sondern es obliegt den Experten in dem jeweiligen Anwendungsgebiet, darüber zu entscheiden, welcher Effektgröße eine bedeutsame klinische und/oder biologische Relevanz zugesprochen werden kann und welcher nicht.

Ein grundlegendes Problem in der Forschung zu möglichen Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf den Menschen ist, dass in den wenigsten Arbeiten Effektgrößen angegeben werden. Außerdem lassen sich in den meisten Fällen auch „nur“ grafische Darstellungen von Ergebnissen finden, aus denen deskriptive Statistiken, die zur groben Abschätzung von Effektgrößen benötigt werden, nur schwer abzulesen sind. Eine Arbeit aus dem hier relevanten Forschungsbereich, in der Effektgrößen von Zielvariablen angegeben wurden, ist die von Loughran et al. (2005). In dieser Crossover-Studie wurde der Einfluss einer GSM-Exposition im Vergleich zu einer Sham-Bedingung auf die Makro- und Mikrostruktur des Schlafes von 50 18- bis 60-jährigen Probanden untersucht. Die EEG-Power-Analyse wurde auf Basis von 0.25 Hz-Spektrallinien durchgeführt, wofür partielle η^2-Effektgrößen berechnet wurden. Die statistischen Berechnungen erfolgten mit dem Programm SPSS. Für die Spektrallinien im Sigma-Frequenzband wurden partielle η^2-Effektgrößen in Höhe von annähernd 0.1 gefunden, was nach aktuell gültiger Konvention für das Effektstärkemaß η^2 einem mittleren Effekt entspricht [$0.01 \leq \eta^2 < 0.06$ (kleiner Effekt), $0.06 \leq \eta^2 < 0.14$ (mittlerer Effekt) und $\eta^2 \geq 0.14$ (großer Effekt); (Cohen, 1988)]. Hierbei müssen allerdings zwei Aspekte beachtet werden: (1) Die von Cohen (1988) vorgeschlagenen Richtwerte für das Effektgrößenmaß η^2 wurden für unabhängige, nicht-messwiederholte Daten formuliert. Eine Anwendung dieser Werte zur Interpretation von Ergebnissen aus Studien mit Messwiederholungen ist somit eigentlich nicht möglich, da die aus solchen Studien resultierenden Effektgrößen stark von dem Ausmaß der Korrelation der wiederholten Messungen sowie

von der Anzahl der messwiederholten Faktoren bzw. der Anzahl der Ausprägungen eines messwiederholten Faktors abhängig sind. Direkte Vergleiche von Ergebnissen aus Studien mit Messwiederholungen sind dementsprechend auch erst zulässig, wenn sich die Untersuchungen in diesen Punkten sehr ähnlich sind. Dieser Sachverhalt sollte bedacht werden, wenn im Fall einer Messwiederholung beabsichtigt ist, Effektgrößenkonventionen als Interpretationshilfe heranzuziehen (Rasch et al., 2010). (2) Generell ist die Verwendung des partiellen η^2, vorzugsweise in Kombination mit dem generalisierten η^2, dem normalen η^2 als Effektgrößenmaß vorzuziehen, da es bei sehr ähnlichem experimentellem Design einen Ergebnisvergleich zwischen Studien möglich macht. Somit können also in der Literatur berichtete partielle η^2-Effektgrößen prinzipiell für Fallzahlkalkulationen verwendet werden (zur Orientierung an die Konventionen für das Effektgrößenmaß η^2 sollte allerdings das generalisierte η^2 herangezogen werden) (Lakens, 2013). Das oben bereits erwähnte Programm *G*Power 3* erlaubt sogar die direkte Berechnung der von der Software verwendeten Effektgröße f aus einem angegebenen partiellen η^2-Wert. Bei dieser Vorgehensweise ist aber absolute Vorsicht geboten, wenn die empirischen partiellen η^2-Werte mit dem Statistikprogramm SPSS berechnet wurden. Während *G*Power 3* partielle η^2-Werte verlangt, zu denen zusätzlich noch eine Angabe zum Ausmaß der Korrelation der Daten gemacht werden muss, ist in mit SPSS berechneten partiellen η^2-Werten diese Abhängigkeit bereits enthalten (Lakens, 2013; Rasch et al., 2010). Eine Nichtberücksichtigung dieser fehlenden Übereinstimmung würde bei einer Fallzahlkalkulation zu einer deutlich kleineren berechneten Stichprobe führen. Dementsprechend ist es notwendig, vor der Verwendung von mit SPSS berechneten partiellen η^2-Werten, diese in *G*Power 3* kompatible Größen umzurechnen. Die dafür benötigten Formeln sind bei Lakens (2013) zu finden.

Für das bereits angesprochene Studienergebnis von Loughran et al. (2005) hätte diese Korrektur zur Folge, dass die Fallzahlkalkulation nicht auf Basis des beobachteten partiellen η^2-Wertes von 0.1 (Wert entspricht einem mittleren Effekt) durchgeführt werden dürfte, sondern ein partielles η^2 von aufgerundet 0.03 (Wert entspricht einem kleinen Effekt) als Effektgröße angenommen werden müsste. Um dieses Studienergebnis dann mit einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.05 und einer Power von 0.8 replizieren zu können, müsste unter der Annahme, dass die primäre Zielvariable einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt und diese Hypothese bei einem cross-over Design mit einer Varianzanalyse mit Messwiederholung getestet wird, eine Stichprobe von $n = 66$ untersucht werden (dabei wurde eine Korrelation zwischen den Messwiederholungen von 0.5 angenommen). Die Untersuchung einer derart großen Stichprobe war in der vorliegenden Studie aus logistischen, zeitlichen und ökonomischen Gründen nicht zu realisieren. Bei fehlender Korrektur der Effektgröße wäre unter sonst gleichen Randbedingungen für eine Replikation der Studienergebnisse bereits eine Stichprobe von $n = 20$ ausreichend gewesen. Soll allerdings die Tatsache, dass selbst kleine Effekte nicht zu

vernachlässigen sind, bei der Fallzahlkalkulation Berücksichtigung finden, kann die Berechnung mit einem nach den Konventionen von Cohen (1988) größtmöglich angenommen kleinen Effekt ($\eta^2 = 0.059$) durchgeführt werden, woraus sich bei sonst gleichen Randbedingungen eine Stichprobengröße von $n = 34$ ergibt. Somit ließen sich kleine Effekte immer noch mit ausreichender Sicherheit belastbar nachweisen.

Allgemein ist aber zu berücksichtigen, dass absolute Powerspektralwerte auch nach Anwendung gängiger Datentransformationen häufig nur eine eingeschränkte Normalverteilung aufweisen (Gasser et al. 1982). Das hat zur Folge, dass die Voraussetzungen für die Anwendung parametrischer Testverfahren im Zusammenhang mit der statistischen Auswertung von Spektralleistungen nicht gänzlich erfüllt sind und diese Tests dann an Robustheit bezüglich der Kontrolle der Irrtumswahrscheinlichkeit verlieren. Dieser Argumentation folgend wäre eine eher konservative, nichtparametrische Herangehensweise bei der Fallzahlkalkulation in Betracht zu ziehen. Aus eigenen Forschungsergebnissen ist bekannt, dass bei der Verwendung von paarweisen Analysen auf der Ebene individueller Unterschiede bei einer Stichprobengröße von $n = 30$ überwiegend mittlere Effekte belastbar nachgewiesen werden können. Diese entsprechen laut Konvention einem Cohen's d von 0.5 bis < 0.8 bzw. einem r, das aus Cohen's d für nichtparametrische Tests berechnet werden kann, von 0.3 bis < 0.5 (Cohen, 1988). Würde nun angenommen werden, dass die primäre Zielvariable (hier erneut die EEG-Power im Sigma-Frequenzband im NREM-Schlaf) nicht einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt und diese Hypothese bei einem cross-over Design mit dem *Wilcoxon Matched Pairs Signed Rank Test* zu testen wäre, müsste unter Berücksichtigung einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.05 und einer statistischen Power von 0.8 die Stichprobengröße zwischen $n = 17$ (Cohen's $d = 0.79$ bzw. $r = 0.49$) und $n = 39$ (Cohen's $d = 0.5$ bzw. $r = 0.3$) betragen, um derartige Effekte aufzeigen zu können. Bei kleineren angenommenen Effekten würde sich die Anzahl der zu untersuchenden Probanden entsprechend erhöhen (bei Cohen's $d = 0.2$ bzw. $r = 0.1$ ergibt sich ein $n = 230$), was ebenfalls wieder aus logistischen, zeitlichen und ökonomischen Gründen nicht realisierbar ist.

Eine mögliche Maßnahme in so einem Fall wäre, Tests mit einer geringeren Power durchzuführen. Dadurch würde zwar die Trennschärfe leiden, was sicherlich eine große Limitierung darstellt, jedoch nennen Schulz & Grimes in ihrem Lancet-Artikel aus dem Jahr 2005 Gründe, warum Studien mit niedriger Power trotzdem durchgeführt werden sollten: (1) wichtiger als die statische Power sei es, dass eine Studie methodisch fundiert (z.B. adäquates Randomisierungsverfahren) ist, um somit systematische Fehler ausschließen zu können; (2) werden Methoden und Ergebnisse angemessen dargelegt (z.B. mit Hilfe von Intervallschätzern), können mögliche Fehlinterpretationen bedingt durch

die niedrige Power vermieden werden; (3) Studien mit niedriger Power können in Meta-Analysen einfließen und würden gleichzeitig dem Publikationsbias entgegenwirken (Schulz & Grimes 2005).

Mit Ausnutzung der möglichen Ressourcen wurde in der vorliegenden Studie die Fallzahl bis auf n=34 erhöht, so dass auch kleine Effekte im paarweisen Vergleich belastbar nachgewiesen werden können.

VII.2 Verfahren zur Probandenrekrutierung

Die Probanden wurden für diese Studie mit folgenden Verfahren rekrutiert:

- Teilnahme an früheren Studien (Ausnahme Teilnahme an Studien zum Thema Lernen und Gedächtnis)
- Mund-zu-Mund Propaganda
- Anzeige auf eigener Homepage des Kompetenzzentrum Schlafmedizin
- Aushänge in universitären Einrichtungen
- Anzeige auf der Homepage der Charité
- über soziale Netzwerke
- über Adressenlisten, die uns vom Landesamt für Bürger- und Ordnungsangelegenheiten (LABO) zur Verfügung gestellt wurden

Die Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien erfolgte auf verschiedenen Ebenen.

VII.2.1 Stufe 1: Telefoninterview

Die Probanden meldeten sich entweder direkt telefonisch beim Studienpersonal oder wurden kontaktiert, nachdem sie Interesse an näheren Informationen zur Studie per E-Mail bekundet hatten. In dem ersten Gespräch wurden die Interessenten über die Studie (Dauer, Screening-Untersuchungen, Abläufe etc.) informiert. Es erfolgte bereits ein erstes Screening auf Ausschlusskriterien hinsichtlich Alter, Geschlecht, Händigkeit, Beruf (von Bedeutung für die Machbarkeit der Studie hinsichtlich des zeitlichen Aufwands), Krankheiten, Allergien, Medikamenteneinnahme, Tag- / Nachtrhythmus, Schlafstörungen, Implantate, Tätowierungen, übermäßiger Koffein- / Alkoholkonsum, Drogenkonsum, Seh- und Hörbeeinträchtigungen sowie Raucherstatus.

VII.2.2 Stufe 2: Fragebögen

Die auf der nächsten Stufe des Screenings verwendeten Fragebögen sind in Tab. VII.1 zusammengestellt und im Folgenden kurz beschrieben.

VII.2.2.1 Allgemeiner Schlaffragebogen (ASF)

Der Allgemeine Schlaffragebogen (ASF) ist ein 100-Item-Screeningfragebogen und gehört in der Ambulanz unseres Schlaflabors zu den täglich eingesetzten Verfahren (ASF; (Zulley, 2002)). Er liefert Angaben zum allgemeinen Schlaf- / Wachverhalten sowie zur Leistungsfähigkeit und gibt Hinweise auf das mögliche Vorliegen von Schlafstörungen und von differentialdiagnostisch zu erwägenden Störungen. Des Weiteren enthält der ASF Fragen zu Vorerkrankungen und zur Familienanamnese sowie zu aktueller Medikamenteneinnahme, zu Alkohol- und Nikotinkonsum.

Tab. VII.1: Fragebögen, die zum Screening eingesetzt wurden.

Im Screening eingesetzte Fragebögen
• Allgemeiner Schlaffragebogen (ASF)
• Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI)
• Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB)
• Schlaftagebuch (Abend-Morgen-Protokolle)
• Epworth Sleepiness Scale (ESS)
• Gesundheitsfragebogen für Patienten (depressive Symptomatik PHQ 9)
• Gesundheitsfragebogen für Patienten (somatische Symptomatik PHQ 15)
• Umweltfaktoren und WLAN

VII.2.2.2 Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI)

Dieses Selbstbeurteilungsverfahren erfasst quantitative Aspekte der Schlafqualität wie Schlafdauer, Einschlaflatenz, Anzahl der nächtlichen Aufwachereignisse, aber auch subjektive Aspekte der Schlaftiefe und der Erholsamkeit des Schlafes (Buysse et al., 1989). Der Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI) besteht aus 19 Selbstbeurteilungsfragen sowie fünf Fragen, die von einem Partner oder Mitbewohner beurteilt werden sollen, wobei in die Auswertung nur die selbstbeurteilten Fragen eingehen. Die

Beurteilungsbasis umfasst die zurückliegenden vier Wochen. Insgesamt gehen sieben Komponenten in die Beurteilung ein: subjektive Schlafqualität, Schlaflatenz, Schlafdauer, Schlafeffizienz, Schlafstörungen, Schlafmittelkonsum und Tagesmüdigkeit. Ein Gesamtwert ≤ 5 ist unauffällig, Werte > 5 weisen auf eine reduzierte Schlafqualität hin. Die deutsche Version dieses Fragebogens ist auf der Homepage der Deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin (DGSM) frei verfügbar (DGSM o. J. a).

VII.2.2.3 Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB)

Der Fragebogen zur Bestimmung des Morgen- und Abendtyps (MAB) nach Horne und Östberg (1976) erhebt interindividuelle Differenzen der bevorzugten Zubettgehzeit sowie der bevorzugten Aktivitätsverteilung über den Tag und erlaubt eine Einteilung in fünf verschiedene Typen. Auf diese Weise lässt sich die individuelle Phasenlage der Circadianrhythmik einschätzen. Die Auswertung der 19 Fragen führt zu einer Kategorisierung in „stark ausgeprägte Morgentypen“ (Score > 69), „schwach ausgeprägte Morgentypen“ (Score = 59 - 69), „Indifferenztypen“ (Score = 42 - 58), „schwach ausgeprägte Abendtypen“ (Score = 31 - 41) und „stark ausgeprägte Abendtypen“ (Score < 31). Probanden mit deutlicher Phasenverschiebung waren in der vorliegenden Studie auszuschließen. Es wurde die deutsche Version des Fragebogens von Östberg (1976) verwendet.

VII.2.2.4 Schlaftagebuch

Über einen Zeitraum von zwei Wochen vor Beginn der Studie dokumentierten die Probanden die Zeit ihres Zubettgehens und Aufstehens, ihre Schlafdauer, Schlaflatenz sowie die Anzahl und Dauer nächtlicher Aufwachepisoden und sie bewerteten die Schlafqualität in der Kurzversion des Abend- und Morgenprotokolls. Auf diese Weise sollten Unregelmäßigkeiten der Tag- / Nachtorganisation sowie ein chronischer Schlafmangel aufgedeckt werden. Die hier verwendete Kurzversion stammt von der DGSM (DGSM o. J. b).

VII.2.2.5 Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS)

Bei der von Johns (1991) entwickelten Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS) handelt es sich um einen Kurzfragebogen zur Erfassung der Einschlafneigung bzw. der allgemeinen Tagesschläfrigkeit unabhängig von der Tages- und Wochenzeit. Retrospektiv wird die subjektiv eingeschätzte Einschlafneigung in acht typischen Alltagssituationen erhoben. Die Bewertung dieser Alltagssituationen durch den Probanden erfolgt auf einer vierstufigen Skala (0 = würde niemals einnicken; 3 = hohe Wahrscheinlichkeit

einzunicken). Der Gesamtwert liegt zwischen 0 und 24, bei einem Wert > 10 wird von einer erhöhten Einschlafneigung ausgegangen. In der vorliegenden Studie wurde die deutsche Version der DGSM eingesetzt (DGSM o. J. c).

VII.2.2.6 Gesundheitsfragebogen für Patienten (depressive Symptome PHQ-9)

Der Fragebogen PHQ-9 umfasst die neun Fragen, die im Patient Health Questionnaire (PHQ, Spitzer et al. 1999) eine Beurteilung der depressiven Symptomatik ermöglichen. Zu jeder Frage kann unter vier Antwortkategorien gewählt werden: „*überhaupt nicht*“ (0), „*an einzelnen Tagen*“ (1), „*an mehr als der Hälfte der Tage*“ (2) und „*beinahe jeden Tag*“ (3). Je nach Antwort wird der in Klammern aufgeführte Punktwert zugewiesen, und es wird einen Summenwert errechnet, der von 0 bis 27 variieren kann. Ein Summenwert von 0 - 4 spricht für eine minimale depressive Symptomatik, Werte von 5 - 9, 10 - 14 und 15 - 27 für eine milde, mittelgradige bzw. schwere depressive Symptomatik. In die Studie wurden nur Probanden mit einem Score < 5 eingeschlossen.

VII.2.2.7 Gesundheitsfragebogen für Patienten (somatische Symptome PHQ-15)

Das Modul PHQ-15 des Patient Health Questionnaire (PHQ, Spitzer et al. 1999) ermöglicht auf der Basis von den 15 häufigsten körperlichen Beschwerden ambulanter Patienten eine Erfassung des Schweregrads somatischer Symptome. Für 13 Beschwerden wird erfragt wie häufig im Verlauf der letzten vier Wochen eine Beeinträchtigung durch die Beschwerde eine vorlag. Die Antwortoptionen zu diesen Fragen sind: „nicht beeinträchtigt“ (0), „wenig beeinträchtigt“ (1) und „stark beeinträchtigt“ (2). Zwei weitere Fragen, die auch im Rahmen des Moduls PHQ-9 gestellt werden, beziehen sich auf die Symptome Schlafstörungen und Müdigkeit/Energielosigkeit. Diese beiden Fragen werden nach den unter VII 2.2.6 bereits gelisteten Antwortkategorien beantwortet. Für die Bewertung werden in diesem Modul die Antwortkategorien „*an mehr als der Hälfte der Tage*“ und „*beinahe jeden Tag*“ zusammengefasst und ein Score von 2 wird zugewiesen. Daraus ergibt sich ein Gesamtscore, der von 0 bis 30 variieren kann. Ein Summenwert von 0 - 1 spricht für eine minimale somatische Symptomstärke, Werte von 5 - 9, 10 - 14 und 15 - 27 für eine milde, mittelgradig ausgeprägte bzw. schwer ausgeprägte somatische Symptomstärke. In die Studie wurden nur Probanden mit einem Score < 10 eingeschlossen.

VII.2.2.8 Umweltfaktoren und WLAN

Um die Einstellung der Probanden zu Funktechnologie zu erheben, wurden Fragen aus dem Fragenkatalog der jährlichen Befragungen des Instituts für angewandte Sozialwissenschaften (Infas) und

des Instituts für Markt- und Sozialforschung (LINK) übernommen, die zum Thema „Wahrnehmung der Bevölkerung im Bereich Mobilfunk“ im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms in den Jahren 2003-2006 sowie 2009 und 2013 durchgeführt wurden (Infas 2004, 2005a, 2005b, 2006, 2010, LINK 2014). Ergänzt wurde eine Frage nach einem WLAN-Access Point im häuslichen Umfeld. Bei Vorhandensein wurden die Probanden gebeten, den Abstand des Gerätes vom Schlafplatz zu schätzen. Die Fragen zu Sorgen wegen möglicher Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Gesundheit wurden um eine Frage zu WLAN-Funknetzen ergänzt.

VII.2.3 Stufe 3: Medizinische Untersuchung

Diese Stufe des Screenings umfasst die in Tab. VII.2 zusammengestellten Verfahren. Die medizinische Untersuchung, die von einem Studienarzt/einer Studienärztin durchgeführt wurde, sowie die Aufzeichnung eines Elektrokardiogramms (EKG) dauerten etwa eine Stunde.

Tab. VII.2: Untersuchungen im Vorfeld der Studie (medizinische Untersuchungen).

Screening-Untersuchungen
• neurologisch-psychiatrisch-internistische Untersuchung
• Elektrokardiogramm (EKG)
• Ggf. ambulante Registrierung von Atmungsparametern (SOMNOtouch RESP)
• Überprüfung der allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit

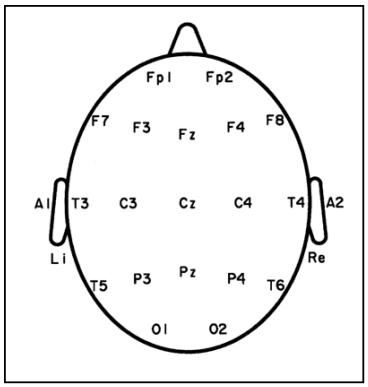
Die Registrierung des EKGs erfolgte nach Einthoven, Goldberger (Brustwandableitung und Extremitäten) mit einem Gerät der Firma Schiller. Sofern sich aus diesen Untersuchungen keine Auffälligkeiten ergaben, war der erste Termin mit Screening-Untersuchungen für den Probanden abgeschlossen. Zusätzlich wurde ein ambulantes Schlafapnoe-Screening mittels SOMNOtouch RESP durchgeführt, d.h. die Probanden bekamen ein Polygraphiegerät für eine Aufzeichnung mit nach Hause.

SOMNOtouch RESP ist ein ambulant einsetzbares Gerät für das Screening von schlafbezogenen Atmungsstörungen. Das Gerät misst u.a. den Atemfluss, die Herzfrequenz, die Sauerstoffsättigung und die Körperlage. Die aufgezeichneten Signale ermöglichten die Erkennung von Apnoen, Hypopnoen, Sauerstoffentsättigungen und Herzfrequenzvariationen, wobei aufgrund der zusätzlichen Messung von Thorax- und Abdomenexkursionen zwischen zentralen, obstruktiven und gemischten Apnoen unterschieden werden kann.

Die Überprüfung des allgemeinen Intelligenzniveaus erfolgte mit dem Mehrfachwahl-Wortschatz-Test (MWT; (Lehrl, 2005)) und den Untertests 3 (U3) und 4 (U4) des Leistungsprüfsystems (LPS; (Horn, 1983)). Der MWT ist ein „Intelligenzspurentest“ und misst die kristallisierte Intelligenz. In diesem Test sollen die Testpersonen nicht nur bekannte Wörter wiedererkennen, sondern auch unbekannte Wörter unterscheiden (Lehrl, 2005). Die LPS-Untertests U3 und U4 untersuchen die flüssige Intelligenz. Beide Untertests erfassen die Denkfähigkeiten, das Erkennen von Regeln und Gesetzmäßigkeiten im Zusammenhang mit logischem Denken (Horn, 1983). In diesen Tests sollen die Testpersonen die nicht passenden geometrischen Figuren (U3) bzw. die nicht passenden Zahlen oder Buchstaben (U4) in unterschiedlichen Folgen von Zahlen bzw. Buchstaben erkennen.

VII.2.4 Stufe 4: Polysomnographische Screening-Untersuchung

Sofern keine der in Stufe 1 bis Stufe 3 aufgeführten Untersuchungen zu einem Ausschluss geführt hatte, wurde in einer polysomnographischen Adaptations- und Screeningnacht das Vorliegen von Schlafstörungen (insbesondere von schlafbezogenen Atmungs- und/oder Bewegungsstörungen) weiter abgeklärt.



(Bio-) Signale
EEG-Kanäle (siehe Abb. links)
EKG
EMG M. mentalis/submentalis
EMG M. tibialis links/rechts
EOG horizontal/vertikal
Abdominale und thorakale Atemexkursionen
Oronasaler Atemfluss

Abb. VII.1: Polysomnographische Screening-Untersuchung. *links:* Positionierung der EEG-Elektroden (nach dem 10-20 System) in der Adaptationsnacht sowie in den Baseline- und Messnächten; *rechts:* Auflistung der aufgezeichneten (Bio-) Signale.

Die polysomnographischen Daten wurden mit dem Polysmith-Aufnahmesystem Neurofax EEG / Polysmith der Firma Nihon Kohden erhoben. Es wurden 19 EEG-Elektroden nach dem 10-20 System (Jasper, 1958), zwei Mastoidelektroden und eine Erdelektrode (Fpz) platziert (siehe Abb. VII.1), und es wurde gegen eine im Aufnahmesystem gebildete interne Referenz abgeleitet. Die Weiterbearbeitung der aufgezeichneten Daten sowie die Klassifikation der Schlafstadien erfolgte nach den Regeln der American Academy of Sleep Medicine (AASM; Iber et al. (2007)).

Zur Aufzeichnung der EEG-, Elektrookulographie (EOG)- und Electromyographie (EMG)-Signale wurden Einmalelektroden aus Silber/Silberchlorid (Ag/AgCl) verwendet, die mit speziell für diese Anwendung konstruierten Kabeln versehen waren (vergl. Kap. V.3). Die Impedanz wurde für die EEG-Elektroden < 10 kΩ gehalten. Die EMG-Elektroden wurden bilateral über dem musculus mentalis platziert. Zusätzlich zu den am Kopf abgeleiteten Biosignalen wurden ebenfalls mit Einmal-Ag/AgCl-Elektroden ein subclaviculäres EKG sowie ein EMG an beiden Beinen, jeweils über dem anterioren musculus tibialis, abgeleitet. Die abdomnialen und thorakalen Atemexkursionen wurden mit Dehnungsgurten (Piezo-Film Respiration Effort SleepSense®) aufgezeichnet. Der oronasale Atemfluss wurde mit einem Thermistor-Sensor (SleepSense®) registriert. Atemgurte, oronasaler Atemfluss und die EMG-Elektroden am Bein wurden ausschließlich während der Screeningnacht eingesetzt.

In Abb. VII.2 sind die Positionen der Elektroden am Kopf und im Gesicht zu sehen, Abb. VII.3 zeigt wie die Probanden in der Nacht exponiert werden. Um zu verhindern, dass durch die im Experiment benutzten modulierten Hochfrequenzsignale in der Elektronik des Aufzeichnungsgerätes Artefakte entstehen, wurde das Gerät speziell ausgestattet. Die betreffenden Maßnahmen sind in Kap. V.2 beschrieben.

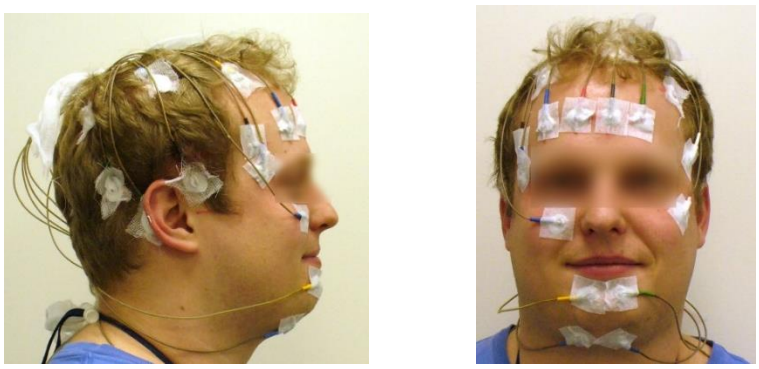


Abb. VII.2: Proband mit 19 nach dem 10-20-System positionierten Elektroden

Abb. VII.3: Exposition der schlafenden Probanden.

Die Abtastfrequenz für alle Biosignale und für die Marker betrug 200 Hz. Während der Aufnahme waren, abgesehen vom Anti-Alias, keine weiteren digitalen Filter wirksam. Die Zeitkonstante bei der Aufzeichnung betrug hardwarebedingt mehrere Sekunden. Für die Schlaf-Auswertung galten die Empfehlungen der AASM.

VII.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Bevor der Studieneinschluss erfolgte, mussten alle Personen ein mehrstufiges umfangreiches Screeningverfahren durchlaufen, in dem die Ein- und Ausschlusskriterien überprüft wurden. Die Einschlusskriterien sind in Tab. VII.3 aufgelistet, die Ausschlusskriterien in Tab. VII.4. Zu Beginn der Rekrutierungsphase wurden in einem Telefoninterview Informationen über den Konsum alkoholischer und koffeinhaltiger Getränke, das aktuelle gesundheitliche Befinden, eine mögliche Medikamenteneinnahme und über das Schlafverhalten der Personen abgefragt. In einem zweiten Schritt wurden weitere Teilnahmekriterien anhand validierter Fragebögen zur Schlafqualität (PSQI), Tageschläfrigkeit (ESS), Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB) sowie zur Abschätzung depressiver (PHQ 9) und klinisch relevanter somatischer Zustände (PHQ 15) geprüft. Als nächstes folgte eine medizinische Untersuchung.

Tab. VII.3: Einschlusskriterien für eine Studienteilnahme.

Einschlusskriterien	
Telefoninterview	
➢ Geschlecht: männlich	➢ Alter: 18 - 30 Jahre
➢ Keine Medikamenteneinnahme	➢ Nichtraucher
➢ normale Tag-/Nachtorganisation	➢ keine Einnahme von Drogen, kein Substanzmissbrauch in der Vorgeschichte
➢ Vorhandene Einwilligungsfähigkeit	➢ Rechtshändigkeit
medizinische Untersuchung	
➢ körperliche und psychische Gesundheit	➢ keine Schlafstörungen in der Vorgeschichte
➢ keine aktuelle subjektive Schlafstörung, d.h. einen Monat vor Beginn der Studie eine Gesamtschlafzeit von min. 6 h/Nacht, Einschlaflatenz unter 30 min und weniger als 45 min Wach nach Schlafbeginn	

Dieses Arztgespräch umfasste eine neurologisch-psychiatrisch-internistische Untersuchung, eine Schlafanamnese, ein EKG sowie eine Überprüfung der allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit.

Zusätzlich wurde ein ambulantes Apnoe-Screening eingesetzt. Im letzten Schritt der Rekrutierungsphase wurden die Personen dann zu einer Screeningnacht im Labor einbestellt, die der Abklärung von etwaigen Schlafstörungen sowie der Eingewöhnung an die Laborbedingungen dienen sollte. Lagen nach Auswertung der Screeningnacht Hinweise für eine Schlafstörung vor (z.B. eine Bewegungsstörung: Arousal-Index mit periodischen Beinbewegungen > 10/h und/oder eine schlafbezogene Atmungsstörung: Apnoe-Hypopnoe-Index > 5/h), wurden die Personen von einer weiteren Studienteilnahme ausgeschlossen. Weitere Ausschlusskriterien waren ein Schlafeffizienzindex < 80% unter den Laborbedingungen und/oder eine Einschlaflatenz > 30 min.

Tab. VII.4: Ausschlusskriterien für eine Studienteilnahme.

Ausschlusskriterien	
Telefoninterview	
➢ übermäßiger Konsum koffeinhaltiger Getränke (> 5 Tassen/Tag)	➢ übermäßiger Alkoholkonsum (> 2 Gläser Wein/Tag oder > 3 Gläser Bier/Tag)
➢ elektronische oder relevante elektrisch leitfähige Implantate jedweder Art	➢ unübliche Tag-/Nachtorganisation (regelmäßige Schichtarbeit)
Fragebögen	
➢ subjektiv erhöhte Einschlafneigung am Tag (ESS > 10)	➢ extremer Morgen- oder Abendtyp (MAB < 31 oder MAB > 69)
➢ schlechte Schlafqualität (PSQI > 5)	➢ PHQ 15: somatischer Beschwerden Score > 9
➢ PHQ 9: depressive Symptome Score > 4	
medizinische Untersuchung	
➢ Vorliegen schwerwiegender neurologischer und internistischer Vorerkrankungen	➢ Einschränkung der Konzentration oder Aufmerksamkeit, Beeinträchtigung der Merkfähigkeit oder des Gedächtnisses, der Sprache oder der Motorik
➢ *akute* körperliche Erkrankung jedweder Art	➢ psychische Erkrankungen in der Vorgeschichte oder aktuell
➢ Operationen und Eingriffe am ZNS in den letzten sechs Monaten	➢ Allergien, soweit sie für das Kleben von Elektroden von Bedeutung sind
➢ stärkere Beeinträchtigung des Seh- und Hörvermögens	➢ Auffälligkeiten im EKG
Screeningnacht	
➢ PLMS-Arousal-Index (PLMSAI) > 10/h, Apnoe-Hypopnoe-Index (AHI) > 5/h	➢ Einschlaflatenz > 30 min; Schlafeffizienz-Index < 80%

VII.4 Probandenrekrutierung

In Abb. VII.4 ist der Prozess der Probandenrekrutierung mit den Gründen für Nichtteilnahme bzw. vorzeitige Beendigung der Studie und der jeweiligen Anzahl von Probanden als Flussdiagramm dargestellt.

Abb. VII.4: Diagramm zur Probandenrekrutierung.

Von den insgesamt 185 Nächten mussten 5 Adaptationsnächte aufgrund technischer Probleme wiederholt werden. Fehler bei Baseline- oder Messnächten führten zu Dropouts, da eine Wiederholung bedingt durch die Lernaufgaben nicht möglich war.

Eine Charakterisierung der Stichprobe hinsichtlich des Alters, hinsichtlich der Scores in den Screening-Fragebögen sowie hinsichtlich der Ergebnisse aus den Adapatationsnächten finden sich in Tab. VII.5.

Tab. VII.5: Stichprobencharakteristika (n = 34). Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichung (SD) sowie Minimum, Maximum und Range für folgende Variablen: Alter in Jahren, Score der Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS); Gesamtscore des Pittsburgh Schlafqualitäts-Index (PSQI); Score im Fragebogen zur Bestimmung des Morgen-Abendtyps (MAB); Score zur depressiven Symptomatik im Patient Health Questionnaire (PHQ-9), Score zur somatischen Symptomatik im Patient Health Questionnaire (PHQ-15), Schlafeffizienzindex (SEI), Einschlaflatenz (SOL), Apnoe-Hypopnoe-Index (AHI), Index für periodische Beinbewegungen mit Arousals (PLMAI).

Merkmal	Mittelwert	± SD	Range	Minimum – Maximum
Alter	24,1	± 2,9	10	20 – 30
ESS	5,2	± 2,4	9	1 – 10
PSQI	2,6	± 1,2	5	0 – 5
MAB	51,7	± 6,9	30	36 – 66
PHQ-9	2,0	± 1,4	4	0 – 4
PHQ-15	1,9	± 1,9	7	0 – 7
SEI	91,7	± 4,9	16,4	81,7 - 98,1
SOL	10,0	± 7,7	29,5	0,0 - 29,5
AHI	1,0	± 0,2	4,1	0,0 – 4,1
PLMAI	0,8	± 0,3	7,7	0,0 – 7,7

In Abb. VII.5 sind die Ergebnisse zur Charakterisierung der Stichprobe hinsichtlich von Bedenken bezüglich WLAN-EMF dargestellt. Es ist erkennbar, dass für die gesunden jungen Männer dieser Studie die Umweltfaktoren, die auf EMF-Emissionen unterschiedlicher Quellen bezogen sind, keine sehr große Bedeutung haben. Die stärksten Bedenken unter diesen Faktoren galten dem Gebrauch von Mobiltelefonen, der Rang 7 der insgesamt 14 Umweltfaktoren einnahm. Bedenken gegenüber WLAN und Mobilfunk-Basisstationen ähnelten einander und waren gering (Ränge 11 und 12). Nur die Besorgnis wegen Hochspannungsleitungen sowie Radio- und Fernsehanlagen waren geringer. 32 der insgesamt 34 Probanden (94.1%) hatten einen WLAN-Router im Haushalt. Die mittlere Entfernung (± SD) zum Bett betrug 6.6 ± 3.9 m (Bereich: 2 - 20 m).

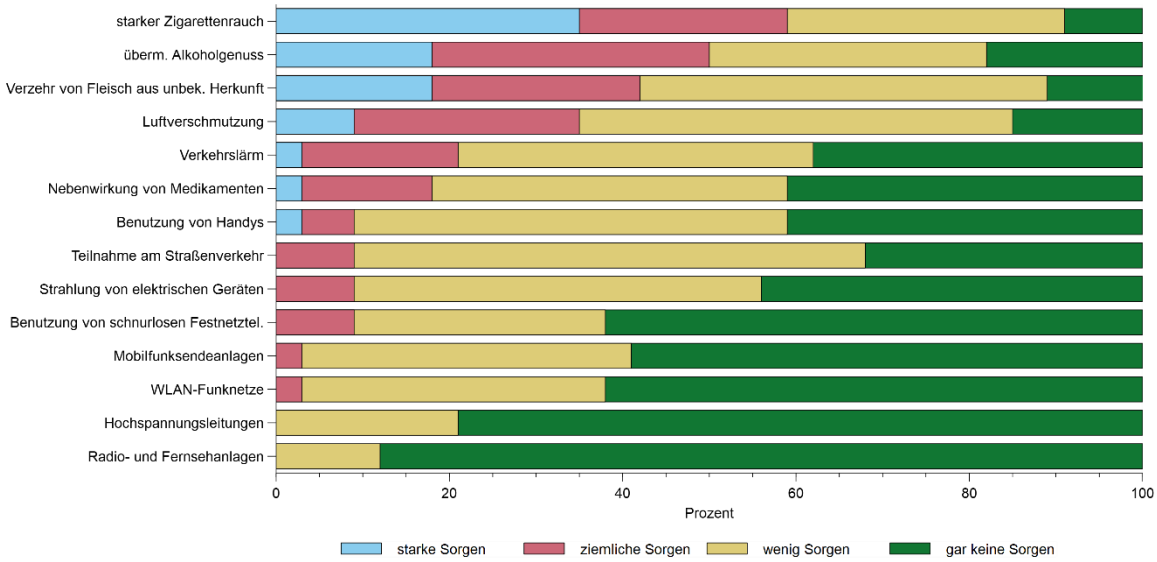


Abb. VII.5: Besorgnis wegen verschiedener Umweltfaktoren. Der Fragebogen wurde auf der Basis der prozentualen Verteilung der Antworten ausgewertet. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse nach dem Ausmaß der Besorgnis sortiert dargestellt.

VIII Methodik der Datenerhebung

Die im Rahmen des Probandenscreenings verwendeten Verfahren wurden in Kap. VII bereits beschrieben. Im Folgenden sind alle Untersuchungsverfahren und psychophysiologischen Tests, die zur Erfassung eines möglichen Einflusses elektromagnetischer Felder auf die Gehirnfunktion im Schlaf und auf die schlafbezogene Gedächtniskonsolidierung eingesetzt wurden, kurz beschrieben.

VIII.1 Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren während der Studie

VIII.1.1 Abend- und Morgenprotokolle

Die Standardversion des Abend- und Morgenprotokolls wurde vom Arbeitskreis Diagnostik der DGSM entwickelt und eignet sich sowohl für Forschungszwecke als auch für den klinischen Alltag (Hoffmann et al., 1997). Das Abendprotokoll wurde vor jeder Nacht, die im Schlaflabor verbracht wird, eingesetzt. Es erhebt die aktuelle Befindlichkeit, die Leistungsfähigkeit und die Müdigkeit während des vorangegangenen Tages. Zusätzlich erfasst das Abendprotokoll, ob die Probanden im Verlauf des Tages besonderen Belastungen ausgesetzt waren oder während des Tages geschlafen haben, was die Ergebnisse der Untersuchungen beeinflussen könnte. Das Morgenprotokoll wurde jedes Mal unmittelbar nach dem Aufstehen im Schlaflabor ausgefüllt. Es erfragt das subjektive Befinden sowie die subjektive Bewertung der Schlafqualität und Schlafdauer. Außerdem können Beeinträchtigungen durch die Messsituation angegeben werden. Die Abend- und Morgenprotokolle sind auf der Homepage der DGSM verfügbar (DGSM o. J. d). Zu jeder Studiennacht wurden sowohl abends als auch morgens zusätzlich ausgefüllt:

VIII.1.2 Visuelle Analogskalen (VAS)

Visuelle Analogskalen eignen sich gut, um subjektive Empfindungen genau messen und quantifizieren zu können (VAS; (Bond and Lader, 1974)). Weitere Vorteile sind, dass sie leicht verständlich und schnell zu bearbeiten sind. Auf einer 100 mm langen Linie wird durch einen senkrechten Strich der momentan empfundene Grad eines bestimmten Gefühls markiert. Die Pole (0 bis 100) entsprechen dabei den Extremzuständen. Folgende Empfindungen wurden abgefragt:

- „Frische“: wundervoll frisch und energiegeladen (0) – schrecklich müde und lustlos (100)
- „Entspannung“: entspannt (0) – angespannt (100)
- „Wachheit“: hellwach (0) – schläfrig (100)

- **„Konzentration“**: konzentriert (0) – unkonzentriert (100)
- **„Interesse“**: lustlos (0) – interessiert (100)
- **„Ängstlichkeit“**: ängstlich (0) – gelassen (100)

VIII.1.3 Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)

Mit Hilfe dieses Selbstbeurteilungsfragebogens können unterschiedliche Gefühle und Empfindungen beschrieben werden (PANAS; (Watson et al. 1988)). Der Fragebogen besteht aus 20 Items, wobei die eine Hälfte der Items positive und die andere Hälfte der Items negative Gefühle widerspiegelt. Anhand von fünf Abstufungen (von 1 = „ganz wenig oder gar nicht“ bis 5 = „äußerst“) soll die Intensität des entsprechenden Stimmungszustandes angegeben werden. Die Werte der Skalen werden getrennt voneinander aufaddiert. Der Fragebogen umfasst sechs verschiedene Zeitinstruktionen, sodass sich die Beschreibung der Affektlage auch auf zurückliegende Zeitpunkte beziehen kann. Für die vorliegende Studie war jedoch ausschließlich der aktuelle Gefühlszustand von Bedeutung. Es wurde die deutsche Version des Fragebogens verwendet (Krohne et al., 1996). Für die Summen der Items „Positiver Affekt“ (PA) und „Negativer Affekt“ (NA) wurden von Watson et al. (1988) Normwerte für alle sechs verschiedenen Zeitintervalle erstellt, die von einer überwiegend studentischen Population aus den USA stammen. In der deutschen Validierungsstudie von Krohne et al. (1996) wurden Summen der Items „Positiver Affekt“ (PA) und „Negativer Affekt“ (NA) sowie Mittelwerte und Standardabweichungen auf Einzelitemebene publiziert, die von 349 Personen (205 Frauen und 144 Männern) stammen, die die PANAS in einer neutralen Situation ausgefüllt haben.

VIII.1.4 State-Trait-Angst-Inventar (STAI)

Das State-Trait-Angst-Inventar ist ein Verfahren zur Erfassung von Angst (STAI; (Spielberger et al., 1970). Dabei ermöglicht das Inventar eine Unterscheidung zwischen Angst als situationsbedingtem Zustand (State) und Angst als mehr oder weniger festem Bestandteil der Persönlichkeit (Trait). Für beide Dimensionen stehen getrennte Fragebögen mit jeweils 20 Items zur Verfügung. Der in der vorliegenden Studie eingesetzte State-Fragebogen umfasst zehn positiv und zehn negativ formulierte Feststellungen zur Selbstbeschreibung. Vier Intensitätsstufen (von 1 = „überhaupt nicht“ bis 4 = „sehr“) ermöglichen die Einschätzung des aktuellen Gefühlzustandes. Es sind somit Werte von 20 bis 80 möglich. Die hier eingesetzte deutsche Version entspricht einer Übersetzung von Laux et al. (1981). Für die Interpretation der Ergebnisse stehen in diesem Manual Referenzwerte (Mittelwerte und Standardabweichungen) getrennt für Männer und Frauen und nach verschiedenen Altersklassen zur Verfügung.

VIII.1.5 Gießener Beschwerdebogen (GBB-24)

Der Gießener Beschwerdebogen (Brähler & Scheer 1979) ist ein häufig verwendetes Verfahren zur Erfassung der psychosomatischen Mitbedingtheit von körperlichen Beschwerden. Die hier eingesetzte Kurzform GBB-24 umfasst 24 Beschwerden, die vier unterschiedlichen Bereichen (Erschöpfung, Magenbeschwerden, Gliederschmerzen, Herzbeschwerden) zugeordnet werden (Brähler et al. 2008). Die Stärke der einzelnen Beschwerden wird auf einer 5-Stufen-Skala (nicht = 0, kaum = 1, einigermaßen = 2, erheblich = 3, stark = 4) bewertet. Der Gesamtwert spiegelt den Beschwerdedruck wider. Es werden die Summenwerte für die vier Bereiche (Erschöpfung, Magenbeschwerden, Gliederschmerzen, Herzbeschwerden) und der Gesamtwert (Beschwerdedruck) dieser vier Bereiche für den GBB-24 berechnet. Für einen Vergleich der Mittelwerte der vorliegenden Stichprobe mit Werten aus der Allgemeinbevölkerung stehen Referenzwerte für Männer bis 40 Jahren für den Gesamtwert und die vier Subskalen zur Verfügung (Brähler et al. 2008).

VIII.1.6 Einschätzung der Exposition durch die Probanden

Zur Bestimmung der Güte der Verblindung der Studie wurden die Studienteilnehmer nach den Messnächten gefragt, ob Ihrer Meinung nach in der vorangegangenen Nacht eine Wi-Fi-Exposition stattgefunden hat. Die Antwortmöglichkeiten sind „ja“, „nein“ und „weiß ich nicht“. Diese Information wurde mit dem Morgenprotokoll abgefragt.

VIII.2 Subjektive Schlafqualität

Subjektive Daten zur Schlafqualität wurden mit dem standardisierten Morgenprotokoll (Hoffmann et al., 1997) erhoben. Zu den subjektiven Informationen gehörten die Gesamtschlafzeit (sTST [min]), die Schlaflatenz (sSOL [min]), die Wach-Gesamtdauer nach dem ersten Einschlafen (sWASO, [min]), die absolute Häufigkeit des Erwachens (sAWA) und die Erholsamkeit des Schlafes, die mit einer der fünf Kategorien: (1) sehr erholsam, (2) ziemlich erholsam, (3) mittelmäßig erholsam, (4) kaum erholsam oder (5) gar nicht erholsam anzugeben war. Da die Ausprägung (4) nur zweimal und die Ausprägung (5) gar nicht vorkam, wurden die Ausprägungen (3), (4) und (5) für die statistische Analyse unter (3) subsummiert (Tab. VIII.1).

VIII.3 Polysomnographie (PSG)

Wie schon in den Screeningnächten wurde auch in jeder Studiennacht (Baseline- und Messnächte) das EEG mit 19 Elektroden abgeleitet. Abweichend von der polysomnographischen Ableitung in der

Adaptations- / Screeningnacht (Kap. VII.2.4), wurde in den Studiennächten auf die Aufzeichnung des Muskeltonus an den Beinen (EMG M. tibialis links/rechts) sowie der Atemparameter (Atemexkursionen, Atemfluss und Sauerstoffsättigung) verzichtet. Die Impedanz der Ag/AgCl-EEG-Elektroden wurde auch in den Studiennächten < 10 kΩ gehalten.

Tab. VIII.1: Parameter zur Charakterisierung der subjektiven Schlafqualität

Variable	Einheit	Charakterisierung
Subjektive Schlafparameter		
sSOL	min	Subjektive Einschlaflatenz
sAWA	#	Subjektive Anzahl von Aufwachereignissen
sWASO	min	Subjektive Wachzeit nach Schlafbeginn
sTST	min	Subjektive Gesamtschlafzeit
Erholsamkeit		(1) sehr erholsam, (2) ziemlich erholsam, (3) mittelmäßig erholsam

Wie die Adaptationsnächte wurden auch die Studiennächte nach dem internationalen Standard der American Academy of Sleep Medicine (AASM, Iber et al. (2007)) ausgewertet, um objektive Daten zur Makrostruktur des Schlafs unter Baseline- und Experimentalbedingungen zu erhalten. Die Dauer jeder einzelnen Polysomnographie (Licht Aus bis Licht An) wurde auf 480 min festgelegt. Wie in den Screeningnächten erfolgte auch in den Studiennächten die Schlafaufzeichnung mit einem Nihon-Kohden/Polysmith System (Neurofax EEG-9200, Nihon Kohden, Tokio, Japan).

VIII.3.1 Makrostruktur des Schlafs

Die PSG wurden durch erfahrene, Clinilabs-zertifizierte Scorer entsprechend dem AASM-Standard nach Iber et al. (2007) ausgewertet. Aus den erstellten Scorings wurden 24 Variablen abgeleitet, die die Makrostruktur des Schlafes beschreiben [z.B. Schlaflatenz (sleep onset latency, SOL), Gesamtschlafzeit (total sleep time, TST), Schlafeffizienz (sleep efficiency index, SEI) und die Verteilung der Schlafstadien]. Zusätzlich wurden 15 Makrostrukturvariablen getrennt für die erste und zweite Nachthälfte bestimmt, um zeitlich über die Nacht variierende Effekte untersuchen zu können. Alle in der vorliegenden Studie betrachteten Parameter zur Makrostruktur sind zusammen mit einer kurzen Beschreibung in Tabelle VIII.2 aufgeführt.

Tab. VIII.2: Objektive Parameter zur Charakterisierung der Makrostruktur des Schlafes.

Variable	Einheit	Charakterisierung
Parameter zu Schlaf-Wach-Zeiten		
TST*)	min	Gesamtschlafzeit (*engl. total sleep time*; TST): Zeit von der ersten bis zum Ende der letzten Epoche Schlaf (ohne nächtliche Wachphasen)
SPT	min	Gesamtschlafperiode (*engl. total sleep period*; TSP): Zeit von der ersten bis zum Ende der letzten Epoche Schlaf (einschließlich der nächtlichen Wachphasen)
WASO	min	Wach nach Schlafbeginn (*engl. wake after sleep onset*; WASO): alle Wachphasen zwischen der ersten Epoche Schlaf und dem „Licht an“-Zeitpunkt am Morgen
WSPT*)	min	Wach in der Gesamtschlafperiode (*engl. wake within total sleep period*; WTSP): alle Wachphasen zwischen der ersten und dem Ende der letzten Epoche Schlaf
SEI*)	%	Schlafeffizienzindex *(engl. sleep efficiency index*; SEI): Quotient aus der TST und der Gesamtbettzeit (*engl. time in bed*; TIB) *100
Latenzparameter		
SOL	min	Einschlaflatenz (*engl. Sleep onset latency*; SOL): Zeit vom "Licht aus"-Zeitpunkt bis zur ersten Epoche irgendeines Schlafstadiums
LPS	min	Latenz zu kontinuierlichem Schlaf (*engl. latency to persistent sleep*; LPS): Zeit vom "Licht aus"-Zeitpunkt bis zu den ersten 20 konsekutiven Epochen jedes beliebigen Schlafstadiums
RL	min	REM-Latenz (SO) (*engl. REM sleep latency from sleep onset*; RL): Zeit vom Schlafbeginn bis zur ersten Epoche Stadium R
N3L	min	Tiefschlaflatenz (SO) (*engl. slow wave sleep latency from sleep onset*; N3L): Zeit vom Schlafbeginn bis zum ersten Auftreten einer Epoche N3
LN2	min	N2-Latenz (LO) *(engl. N2 sleep latency from lights out; LN2)*: Latenz vom „Licht aus“-Zeitpunkt bis zur ersten Epoche N2
LN3	min	N3-Latenz (LO) *(engl. N3 sleep latency from lights out; LN3)*: Latenz vom „Licht aus“-Zeitpunkt bis zur ersten Epoche N3
LR	min	REM-Latenz (LO) *(engl. REM sleep latency from lights out; LR)*: Latenz vom „Licht aus“-Zeitpunkt bis zur ersten Epoche R
Parameter zur Schlafarchitektur		
N1*)	min	Stadium N1: Summe der Epochen mit Stadium N1 / 2
N1P*)	%	Anteil Stadium N1 von der TST: (Stadium N1 / TST) *100
N2*)	min	Stadium N2: Summe der Epochen mit Stadium N2 / 2
N2P*)	%	Anteil Stadium N2 von der TST: (Stadium N2 / TST) *100
N3*)	min	Stadium N3: Summe der Epochen mit Stadium N3 / 2

Variable	Einheit	Charakterisierung
N3P*)	%	Anteil Stadium N3 von der TST: (Stadium N3 / TST) *100
R*)	min	Stadium REM: Summe der Epochen mit Stadium REM / 2
RP*)	%	Anteil Stadium REM von der TST: (Stadium REM / TST) *100
Parameter zur Schlafkontinuität		
AWA-N*)	#	Anzahl der Aufwachereignisse in der TST
AWA-I*)	/h TST	Anzahl der Aufwachereignisse pro Stunde TST
SSS-N*)	#	Anzahl der Schlafstadienwechsel in der TST
SSS-I*)	/h TST	Anzahl der Schlafstadienwechsel pro Stunde TST

*) diese Variablen wurden auch getrennt für die erste und zweite Nachthälfte ausgewertet.

VIII.3.2 Mikrostruktur des Schlafes

Um zu überprüfen, ob eine Wi-Fi-Exposition die Mikrostruktur des Schlafes beeinflusst, wurden verschiedene Zielvariablen herangezogen. Zum einen wurde die Anzahl der Arousal (absolut und als Index bezogen auf 60 min TST) berechnet (siehe Tab. VIII.3). Arousal sind definiert über einen schnellen Wechsel in der EEG-Frequenz für eine Dauer von 3 bis 14 Sekunden, dem mindestens 10 Sekunden Schlaf vorausgehen. Im Stadium R muss zusätzlich zu dieser Bedingung noch eine Erhöhung des Muskeltonus im submentalen EMG von mindestens 1 Sekunde nachweisbar sein (Iber et al., 2007).

Darüber hinaus wurden Leistungsspektren mit einer Frequenzauflösung von 0,25 Hz für einen Frequenzbereich von 0,50 Hz bis 19,75 Hz berechnet. Powerspektralwerte wurden für jede 30-Sekunden-Epoche für die 19 EEG-Elektroden Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1 und O2 jeweils referenziert gegen die gemittelten Mastoide [(A1 + A2) /2] ermittelt. Innerhalb jeder Epoche wurden die Spektralwerte nach Welch's Methode (Welch, 1961) gemittelt.

Die Segmentlänge betrug 4s bei 2s Überlappung. Somit ergaben sich 14 Segmente je Epoche. Auf die Segmente wurde ein von-Hann-Zeitfenster angewandt. Zum Ausschluss artefaktbelasteter Segmente kamen zwei unterschiedliche Kriterien zur Anwendung: 1) Überschritt die Differenz zwischen dem absoluten Maximum und dem absoluten Minimum einen bestimmten Grenzwert, so wurde das betreffende Segment ausgeschlossen. Damit nicht K-Komplexe und Delta-Wellen die Artefakterkennung

zum Ansprechen bringen, aber dennoch eine ausreichende Empfindlichkeit gegenüber Artefakten in niedrigamplitudigem EEG erreicht wird, wurden die Amplituden-Grenzwerte von dem der jeweiligen Epoche zugeordneten Schlafstadium abhängig gemacht.

Tab. VIII.3: Parameter zur Charakterisierung der Mikrostruktur des Schlafes.

Variable	Einheit	Charakterisierung
Arousalparameter		
AR-N	#	Anzahl aller Arousal in der TST
ARNR-N	#	Anzahl aller Arousal im NREM-Schlaf
ARR-N	#	Anzahl aller Arousal im REM-Schlaf
AR-I	/h TST	Arousal-Index pro Stunde TST
ARNR-I	/h NREM	Arousal-Index pro Stunde NREM-Schlaf
ARR-I	/h REM	Arousal-Index pro Stunde REM-Schlaf
Powerspektralwerte in EEG-Frequenzbändern		
SO	μV^2	Langsam oszillierende Wellen im Frequenzbereich 0,50 - 1,00 Hz
Sigma-B	μV^2	Frequenzbereich 11,00 - 16,00 Hz
Sigma-E	μV^2	Frequenzbereich 12,00 – 14,00 Hz
Delta	μV^2	Frequenzbereich 0,50 - 3,75 Hz
Theta	μV^2	Frequenzbereich 4,00 - 7,75 Hz
Alpha	μV^2	Frequenzbereich 8,00 - 11,75 Hz
Beta1	μV^2	Frequenzbereich 12,00 - 15,75 Hz
Beta2	μV^2	Frequenzbereich 16,00 - 19,75 Hz

Entsprechend den Hypnogramm-Daten der PSG wurde ein Grenzwert von 300µVss (Spitze-Spitze) für Schlafstadien N2 und N3 festgelegt, ein Grenzwert von 150uVss für alle anderen Stadien. Störungen vom Stromnetz (50 Hz) beeinflussen die Artefakterkennung, weil sie durch die Überlagerung der Amplituden die Empfindlichkeit der Artefakterkennung zu geringeren Amplituden verschieben. Um

diesen Einfluss zu verhindern, wurde ein 50Hz-Sperrfilter (IIR 2. Ordnung, Q=5) auf alle PSG Daten vor der weiteren Verarbeitung angewandt. 2) Ein weiteres Artefaktkriterium bezog sich auf (im EEG nicht vorkommende) hohe spektrale Leistung im Bereich höherer EEG-Frequenzen. Dies weist auf Muskel- (EMG)-Artefakte und Störsignale aus anderen Quellen hin. Das Kriterium wurde entsprechend einer von Adamczyk (2015) beschriebenen Methode gestaltet: Wenn die mittlere Signalstärke (Effektivwert) im Frequenzbereich von 19,8 bis 45,5 Hz einen Grenzwert von 5,75 µV überschritt, dann wurde das entsprechende Segment ausgeschlossen. Epochen wurden nur in die Analyse einbezogen, wenn nach der Artefaktbehandlung mindestens 10 der 14 möglichen Segmente verblieben.

Zur Erkennung technischer Probleme in den PSG-Aufzeichnungen wurden logarithmierte Spektren für das Schlafstadium N2 an allen Lokalisationen visuell begutachtet. Qualitativ abweichende Kurven, die auf einen hohen Anteil von Fremdsignalen hinweisen, wurden in einigen PSG bei einzelnen Lokalisationen festgestellt. Insgesamt konnten dadurch sechs Spuren in einzelnen Aufzeichnungen identifiziert werden, die daraufhin von weiteren Analysen ausgeschlossen wurden.

Die 0,25 Hz breiten Leistungsspektren wurden anschließend zu folgenden Frequenzbändern zusammengefasst und ausgewertet (siehe auch Tab. VIII.3): a) Einteilung des langsamen Oszillationsfrequenzbereiches (SO: 0,50 - 1.00 Hz) basierend auf den Forschungsergebnissen von Achermann & Borbely (1997), b) EEG-Frequenzbänder, die entsprechend den IPEG-Empfehlungen (Jobert et al., 2013) definiert waren: Delta (0,50 - 3,75 Hz), Theta (4,00 - 7,75 Hz), Alpha (8,00 - 11,75 Hz), Beta1 (12,00 Hz - 15,75 Hz) and Beta2 (16,00 - 19,75 Hz) und c) Schlafspindelfrequenzbereiche entsprechend der im AASM-Manual vorgeschlagenen Definitionen: breites Schlafspindelfrequenzband (Sigma-breit; 11,00 - 16,00 Hz), enges Schlafspindelfrequenzband (Sigma-eng; 12,00 - 14,00 Hz). Die Auswertungen zu den langsamen Oszillationen und den Schlafspindelfrequenzbändern erfolgten nur für die Schlafstadien N2 und N3, die EEG-Power in den übrigen Frequenzbändern wurde dagegen getrennt für alle Schlafstadien ausgewertet.

VIII.4 Gedächtnistests

VIII.4.1 Deklaratives Gedächtnis: Wortpaarassoziationstest (WPT)

Die Überprüfung des *deklarativen Gedächtnisses* erfolgte mittels eines Wortpaarassoziationstests (adaptiert von Marshall et al. (2006; 2004) und Pastötter & Bäuml (2016)). Bei dieser Aufgabe handelt es sich um assoziatives Lernen. Das Testmaterial besteht aus 101 Wortpaaren (1. Wort = *Cue*; 2. Wort = *Target*), wobei die drei ersten und drei letzten Wortpaare der Lernlisten von der Auswertung ausgeschlossen werden. Auf diese Weise werden *Primacy*- und *Recency*-Effekte kontrolliert (insgesamt

gibt es sechs *Dummy* Wortpaare). Während der Lernphase wurden die Wortpaare der Liste zweimal in gleicher Reihenfolge präsentiert (Abb. VIII.1). Nach der Lernperiode erfolgte eine Abfrage, bei der die Cues in abweichender Reihenfolge vom Lernen präsentiert wurden, um serielles Lernen zu kontrollieren.

Die Probanden sollten bei der Abfrage das jeweils zum Cue gehörige Wort (Target) des gelernten Wortpaares laut nennen (Abb. VIII.1). Die Antwortzeit war dabei nicht begrenzt. Bei jeder Antwort gab es ein Feedback, indem das richtige Targetwort gezeigt wurde. Am Ende des Tests erschien die Anzahl korrekt erinnerter Wortpaare. Am nächsten Morgen erfolgte (ohne erneute vorherige Präsentation) eine weitere Abfrage ohne Feedback (Abb. VIII.1). Der Test umfasste zwei verschiedene Wortpaarlisten (Parallelformen), die über alle Probanden hinweg ausbalanciert in den Messnächten benutzt wurden. Die Wortpaare wurden in schwarzer Schrift auf einem 19´´ (48 cm) Monitor mit weißem Hintergrund präsentiert.

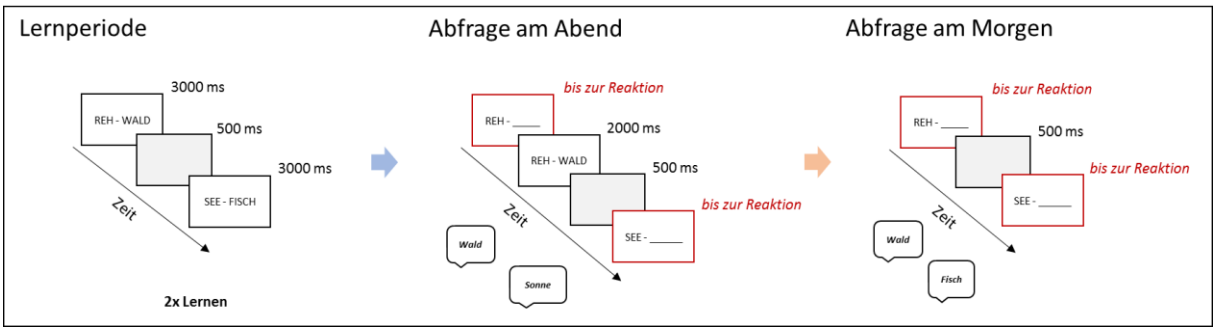


Abb. VIII.1: Durchführung des Wortpaarassoziationstests (WPT).

Als Zielparameter für die Auswertung wurden die korrekten Wortpaare am Abend und am Morgen verwendet.

VIII.4.2 Emotionales Gedächtnis: Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung (FRT)

Bei der Untersuchung des emotionalen Gedächtnisses wurden Bilder mit emotionalen Gesichtsausdrücken aus dem standardisierten Katalog des Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF von Lundqvist, Flykt, & Öhman (1998)) präsentiert. Die Testdurchführung erfolgte analog zu Wagner et al. (2007). In der Lernphase sollten die Probanden auf die Emotion des gezeigten Bildes reagieren, in den Abfragen mussten die Probanden entscheiden, ob das konkrete Bild bereits bekannt ist oder neu. Eigene Vortests hatten gezeigt, dass die unterschiedliche Reaktion auf Emotionen und Bekanntheitsgrad

in der Lern- und Abfragephase den Schwierigkeitsgrad des Tests im Vergleich zu einer Version ohne Reaktionen beim Lernen wie bei Tessier et al. (2015) erhöht.

Als Stimuli wurden insgesamt 180 Farbfotos aus den KDEF ausgewählt. Es handelt sich um Fotografien von 30 männlichen und 30 weiblichen Personen mit jeweils drei verschiedenen Gesichtsausdrücken: positiv (glücklich; *„happy"*), negativ (ärgerlich; *„angry"*) oder neutral. In der Lernphase wurden Bilder von fünf Männern und fünf Frauen mit jeweils allen drei Gesichtsausdrücken gezeigt. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 30 Bildern, die nur einmal erschienen. Die Farbfotos wurden auf einem schwarzen Hintergrund präsentiert. Sie hatten eine Größe von 20.5 cm (Breite) x 25.5 cm (Höhe), der Betrachtungsabstand vom Probanden betrug 60 cm. Die Aufgabe des Probanden bestand darin, auf die unterschiedlichen Emotionen per Tastendruck zu reagieren, sobald das jeweilige Bild vom Bildschirm verschwand (vgl. Abb. VIII.2). Es gab für die drei Emotionen drei verschiedene Tasten. Bei der anschließenden Abfrage am Abend wurden die schon bekannten Bilder aus der Lernphase sowie Bilder von 5 weiteren Frauen und 5 weiteren Männern gezeigt, wiederum mit jeweils allen drei Gesichtsausdrücken. Daraus resultierte eine Gesamtzahl von 60 Bildern. Aufgabe des Probanden bei der Abfrage war es, durch das Drücken einer von zwei Tasten anzugeben, ob das aktuelle Bild eines ist, dass er bereits zuvor gesehen hatte oder ob es ein neues Bild war (vgl. Abb. VIII.2). Die Abfrage am Morgen verlief analog zu der Abfrage am Abend. Die 30 Bilder aus der Lernphase wurden am Morgen mit 30 neuen Bildern (von anderen 5 Frauen und 5 Männern) kombiniert. Der Test umfasste zwei parallele Versionen mit komplett unterschiedlichen Bildern (siehe Tab: VIII.4). Die Zuordnung der Testversion zu Probanden und Messnächten erfolgte balanciert. In jedem Test war die Reihenfolge der Bilder randomisiert, jedoch für alle Anwendungen gleich.

Tab. VIII.4:: Zusammenstellung der Bilder für den emotionalen Gedächtnistest. In jedem der sechs komplett unterschiedlichen Sets an Bildern gibt es Bilder von 5 Männern und 5 Frauen, die mit jeweils allen drei Emotionen abgebildet werden.

	Version 1			***Version 2***		
	Lern-Phase	zusätzlich zum Set A bei Abfrage am Abend	zusätzlich zum Set A bei Abfrage am Morgen	**Lern-Phase**	zusätzlich zum Set D Bei Abfrage am Abend	zusätzlich zum Set D bei Abfrage am Morgen
Sets	**A** *(alt)*	B (*neu*)	C (*neu*) ≠ B	**D** *(alt)* ≠ A	E (*neu*)	F (*neu*) ≠ E
Emotionen	+ / - / N	+ / - / N	+ / - / N	+ / - / N	+ / - / N	+ / - / N
Männer	5	5	5	5	5	5
Frauen	5	5	5	5	5	5
Anzahl Bilder	**30**	30	30	**30**	30	30

Als Zielparameter für die Auswertung wurden die am Abend und am Morgen erzielten Werte der *Memory Accuracy* [*Hit Rate* (Rate der bekannten Gesichter, die als bekannt identifiziert wurden) - *False-Alarm Rate* (Rate neuer Gesichter, die als bekannt identifiziert wurden)] herangezogen. Die *Memory*

Accuracy wurde sowohl für alle Gesichtsausdrücke zusammen als auch für jeden der drei Gesichtsausdrücke (glücklich, neutral, ärgerlich) getrennt bestimmt.

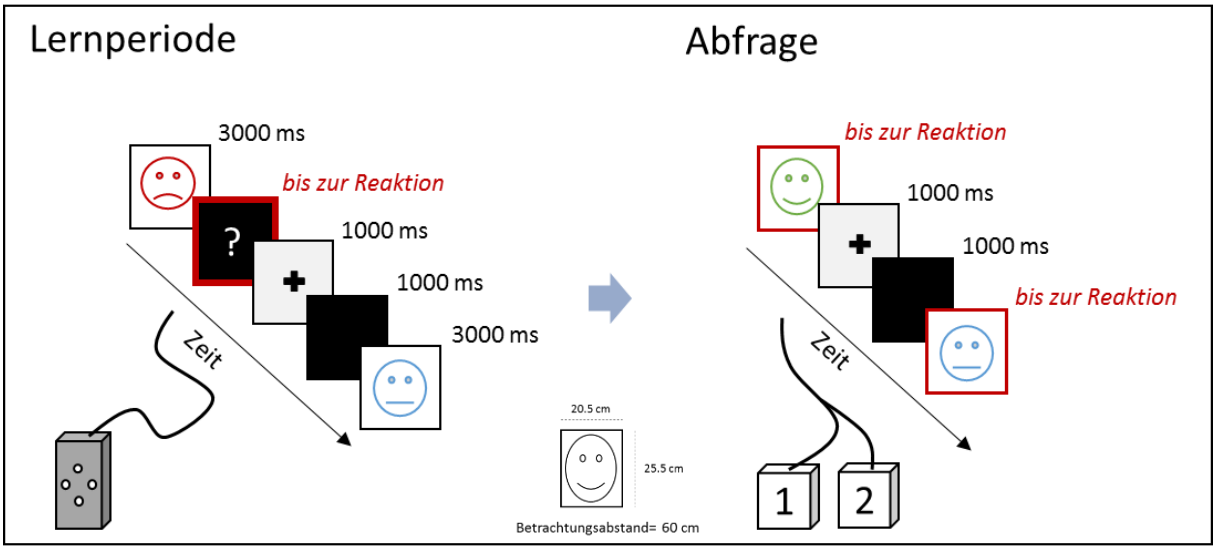


Abb. VIII.2: Durchführung der Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung (FRT).

VIII.4.3 Prozedurales Gedächtnis: Sequentielle Finger-Tapping Aufgabe (SFTT)

Zur Überprüfung des prozeduralen Gedächtnisses wurde eine Tastendruckaufgabe (adaptiert von (Walker et al., 2002)) durchgeführt. Vor dem eigentlichen Test gab es eine Übungsphase. Bei dieser Aufgabe wurde während einer Darbietung (30 s) eine Zahlenreihenfolge bestehend aus fünf Zahlen auf einem Monitor gezeigt (z.B. 4-1-2-3-4). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, diese fünf Zahlen so schnell und so genau wie möglich auf einer Tastatur mit der nicht dominanten (linken) Hand zu drücken. Die Zahlenreihenfolge sollte so oft wie möglich innerhalb von 30 s gedrückt werden. Bei der Lernphase am Abend wurde der Test zwölfmal wiederholt, wobei zwischen den Wiederholungen jeweils eine Pause von 30 s lag. Die Abfrage am Morgen bestand aus drei Wiederholungen (Dauer 30 s) derselben Zahlenreihenfolge, die ebenfalls durch 30 s-Pausen getrennt waren.

Der Test umfasste zwei Versionen (Zahlenreihenfolgen), die über die Probanden balanciert in den Messnächten zum Einsatz kamen. Die Zahlenreihenfolgen wurden auf einem 19´´ (48 cm) Monitor mit weißem Hintergrund präsentiert.

Als Zielparameter für die Auswertung wurden die Mittelwerte der korrekten Sequenzen der letzten drei Trials am Abend sowie der drei Trials am Morgen herangezogen.

VIII.4.4 Kontrolltests

Die Exposition erfolgte während des Schlafes. Dennoch ist es vorstellbar, dass mögliche unterschiedliche Lernerfolge nicht ausschließlich auf einer durch die Exposition veränderten Gedächtniskonsolidierung beruhen, sondern auch auf eine Beeinflussung der allgemeinen kognitiven Funktionen sowie der Leistungsfähigkeit zurückzuführen sind. Um diese Einflussfaktoren überprüfen und ausschließen zu können, wurden vor der Lernphase und nach der Wiederholung der Gedächtnisaufgaben am Morgen zwei Kontrolltests durchgeführt.

Zur Erfassung der Wortflüssigkeit wurde der „Regensburger Wortflüssigkeits-Test“ (RWT; (Aschenbrenner et al. 2000)) eingesetzt. Dabei sollen die Versuchspersonen über einen Zeitraum von zwei Minuten so viele Lösungen wie möglich verbal generieren, die ihnen zu einer bestimmten Kategorie einfallen. Abends wurden bei beiden Untersuchungsbedingungen jeweils die Kategorien „Berufe“ und „Wörter mit dem Anfangsbuchstaben P“ abgefragt. Am Morgen wurden die Kategorien „Hobbys“ und „Wörter mit dem Anfangsbuchstaben M“ abgefragt. Die Kategorien sind jeweils in der Schwierigkeit vergleichbar. Die Zeit wurde mittels einer handelsüblichen Stoppuhr gemessen. Für eine bessere Dokumentation der Ergebnisse wurden die Antworten der Probanden mit einem tragbaren Digitalrekorder (TASCAM DR-05) aufgenommen. Für die Auswertung dieses Tests wurden nur die korrekt genannten Wörter herangezogen. Fehler wie Repetitionen und Regelbrüche (z.B. Wörter mit demselben Wortstamm) wurden nicht berücksichtigt. Jeweils abends und morgens wurden die genannten Wörter in beiden Themengebieten zusammengezählt.

Zur Überprüfung eines expositionsbedingten Einflusses auf das Arbeitsgedächtnis wurde der Untertest „Zahlennachsprechen“ (Digit Span Test) des Wechsler Gedächtnistest – revidierte Fassung für Erwachsene (WMS-R; (Härting et al., 2000)) durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Aufgabe, bei der Zahlenreihenfolgen im ersten Versuchsteil vorwärts (3 bis 8 Ziffern) und im zweiten Versuchsteil rückwärts (2 bis 7 Ziffern) nachgesprochen werden müssen. In jedem Versuchsteil werden beginnend mit der kleinsten Ziffernanzahl die Ziffernfolgen vorgegeben. Dabei wird jede Anzahl von Ziffern konsekutiv zweimal mit unterschiedlichen Ziffern abgefragt. Wenn die Versuchsperson zu einer Ziffernanzahl mindestens eine Folge richtig angibt, wird mit der nächst längeren Ziffernfolge fortgesetzt. Jede korrekt genannte Zahlenreihenfolge wird mit einem Punkt bewertet. Am Ende werden die erzielten Punkte aus beiden Versuchsteilen (vorwärts und rückwärts) zusammengezählt (Range: 0–24). Am Abend und am Morgen sowie in den beiden Messnächten wurden vier unterschiedliche Versionen verwendet.

IX Statistische Auswertung

Bei vier Probanden wurden in beiden Messnächten gleiche Versionen von Gedächtnistests verwendet. Da dies eine Protokollabweichung darstellte, wurden die Daten dieser vier Probanden bei der Auswertung (a) der Ergebnisse zur schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung, (b) der Ergebnisse zu den Kontrollfragebögen, (c) der Ergebnisse zu den Kontrolltests und (d) der Ergebnisse zu den Powerspektralwerten für den Frequenzbereich langsamer Oszillationen sowie für die beiden Spindelfrequenzbänder nicht berücksichtigt. Diese Maßnahme führte zu einer Abweichung von einem komplett ausgeglichenen (ausbalancierten) Design, d.h. die Verteilung der Expositionsabfolge (1. Abfolge: „MN1 = Wi-Fi und MN2 = Sham“; 2. Abfolge: „MN1 = Sham und MN2 = Wi-Fi“) zwischen den Probanden war nicht mehr ausgeglichen (Abfolge 1: 13 Probanden; Abfolge 2: 17 Probanden). Selbst wenn nicht davon ausgegangen werden kann, dass die reine Abfolge der Expositionen einen Einfluss auf die Ergebnisparameter hat (insbesondere auch wegen des ausreichend langen Zeitintervalls zwischen den Messnächten), können Reihenfolgeeffekte z.B. in Form von Gewöhnungs- oder Lerneffekten nicht ausgeschlossen werden. Ist dann eine der Expositionsbedingungen in der zweiten Messnacht häufiger vertreten, ist ein Rückschluss von beobachteten Effekten nicht mehr so einfach möglich. Es wurde deshalb für jede Auswertung, die auf einem Analysesample von 30 Probanden basierte, die Expositionsabfolge als Zwischensubjekt-Faktor in der Analyse berücksichtigt.

Effekte der Wi-Fi-Exposition auf subjektive und objektive Schlafparameter sowie mögliche Unterschiede zwischen den beiden Baseline-Bedingungen wurden auf Grundlage der individuellen Differenzen mittels t-Tests für gepaarte Beobachtungen untersucht. Um einen Schätzwert der Effektgröße zu gewinnen, wurde Cohen's d_{av} und die zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle mittels eines SAS Macros (Kadel & Kip 2012) berechnet. Cohen's d_{av} ist dem klassischen Cohen's d als Maß der Effektstärke bei ungepaarten t-Tests sehr ähnlich. Anstatt der gepoolten Standardabweichung wird bei der Berechnung von Cohen's d_{av} jedoch die durchschnittliche Standardabweichung der beiden wiederholten Messungen ohne Berücksichtigung der Korrelation zwischen den Messungen zur Standardisierung herangezogen (Lakens, 2013). Je größer die Ungleicheit der Varianzen, desto größer der Unterschied zwischen diesen beiden Maßen. Cohen’s d_{av} kann mit den folgenden Bezugswerten interpretiert werden: Kein Effekt bei $|d_{av}| < 0.2$, kleiner Effekt bei $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$, mittlerer Effekt bei $0{,}5 \leq |d_{av}| < 0.8$ und großer Effekt = $|d_{av}| \geq 0.8$ (Cohen, 1988).

Das gleiche statistische Vorgehen kam zur Anwendung, um der Frage nachzugehen, ob Bedenken im Zusammenhang mit der anstehenden (unbekannten) Exposition den Schlaf beeinflussen. Um dies zu überprüfen, wurden die subjektiven und objektiven Schlafparameter der Baselinenächte (die Probanden wussten, dass sie nicht exponiert werden) und die der Messnächte (die Probanden wussten

zwar, dass sie exponiert werden, sie wussten aber nicht, welche der beiden Expositionen stattfinden wird) gepoolt.

Um mögliche Effekte der Wi-Fi-Exposition auf die Powerspektralwerte des Schlaf-EEG zu untersuchen, wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen (repeated-measures ANOVA, RM-ANOVA) durchgeführt. Für die nach IPEG definierten Frequenzbänder wurden im Modell die Innersubjekt-Faktoren EXPOSITION mit den Ausprägungen Wi-Fi und Sham, REGION sowie deren Interaktion berücksichtigt. Für die beiden Schlafspindelfrequenzbänder und den Frequenzbereich, der die langsamen Oszillationen umfasste, wurde, wie oben bereits erwähnt, zusätzlich noch der Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE zum Modell hinzugefügt. Der Faktor REGION umfasste die sechs topografischen Hirnregionen, für die die EEG-Powerwerte bestimmter Lokalisationen gemittelt wurden (Frontopolar: Fp1, Fp2; Frontal: F7, F3, Fz, F4, F8; Zentral: C3, Cz, C4; Temporal: T3, T4, T5, T6; Parietal: P3, Pz, P4; Okzipital: O1, O2). Durch diese Maßnahme wurde sichergestellt, dass die Anzahl der Ausprägungen des Faktors verringert wird.

Da Spektralparameter oft nicht normalverteilt sind, wurden entsprechend dem Vorschlag von Gasser et al. (1982) die absoluten Powerspektralwerte vor weiteren Analysen zunächst logarithmiert. RM-ANOVAs zu den nach IPEG definierten Frequenzbändern wurden für jedes der vier Schlafstadien (N1, N2, N3 und REM) sowie für den NREM-Schlaf getrennt durchgeführt. Die drei restlichen Frequenzbereiche wurden nur in den Schlafstadien N2 und N3 untersucht. Partielle Eta-Quadrat- (η^2p) und generalisierte Eta-Quadrat- (η^2G; Olejnik & Algina, 2003)) Schätzwerte wurden als Maß für die Effektgröße angegeben. Nach Lakens (2013) kann das generalisierte Eta-Quadrat entsprechend den folgenden Bezugswerten interpretiert werden, die auch Cohen (1988) angibt: Kein Effekt bei $\eta^2 < 0.01$, kleiner Effekt bei $0.01 \leq \eta^2 < 0.06$, mittlerer Effekt bei $0.06 \leq \eta^2 < 0.14$ und großer Effekt bei $\eta^2 \geq 0.14$. Da die Sphärizität in allen Fällen mehr oder weniger verletzt war, sind hier Greenhouse-Geisser-korrigierte p Werte angegeben.

Um die vorliegenden Daten, die unter der Sham-Bedingung beobachtet wurden, besser einordnen zu können, wurden sie mit entsprechenden Daten aus einer anderen aus unserem Hause stammenden Studie verglichen, in der bei jungen, gesunden, männlichen Probanden der Einfluss einer TETRA-Exposition auf die Hirnaktivität während des Schlafs untersucht wurde. Diese Vergleiche wurden mittels t-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt. Bei Ungleichheit der Varianzen wurden Satterthwaite-korrigierte Berechnungen verwendet.

Bei Varianzgleichheit wurde als Effektgrößenschätzer die klassische Cohen's d-Variante angegeben. Um bei Ungleichheit der Varianzen der Satterthwaite-Approximation Rechnung zu tragen, wurden die zugehörigen 95%-Konfidenzintervalle nach der Formel von Kadel and Kip (2012) händisch berechnet. Für Cohen's d gelten die gleichen Bezugswerte wie für d_{av}.

Wie schon beschrieben, benutzt das standardisierte Morgenprotokoll eigentlich eine fünfstufige Skala zur Beschreibung der Erholsamkeit des Schlafes. Da zwei der fünf Kategorien zu selten ausgewählt waren, wurden die Antworten in drei Kategorien zusammengefasst [(1) sehr erholsam, (2) ziemlich erholsam, (3) mäßig erholsam]. Die so gebildeten Kategorien wurden statistisch mit dem Stuart-Maxwell Test für zwei abhängige Stichproben geprüft. Dieser Test prüft die Verteilungsunterschiede zweier kategorialer Variablen mit mehr als zwei Merkmalsausprägungen auf Homogenität der Randverteilungen. Zur Überprüfung möglicher Unterschiede zwischen den Verteilungen der Erholsamkeitsangaben unter den Sham-Bedingungen der vorliegenden und der TETRA-Studie wurden mittels eines Chi^2-Homogenitätstests durchgeführt. Die statistischen Analysen wurden mit SAS (Version 9.4) ausgeführt. Ein zweiseitiges Signifikanzniveau von 0.05 wurde benutzt.

X Ergebnisse und Diskussion

X.1 Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren

Wie in Kap. VIII.2 beschrieben, wurden zusätzlich zu den objektiven Daten folgende validierte Instrumente zur Erfassung subjektiver Daten eingesetzt: Morgenprotokolle, visuelle Analogskalen (VAS), die deutsche Version der Positive and Negative Affect Schedule (PANAS), das Stait-Trait-Angst-Inventar (STAI) sowie der Gießener Beschwerdefragebogen (GBB-24). Aus dem Morgenprotoll wurden für die Auswertung sowohl Informationen zur subjektiven Beurteilung der Erholsamkeit des Schlafes als auch (siehe X.2.3) Informationen, die zur Beurteilung der Verblindung der Studie abgefragt wurden (siehe X.1.1), herangezogen.

X.1.1 Morgenprotokoll - Studienverblindung

Die Studie wurde doppelblind, randomisiert in einem ausbalancierten Cross-over Design durchgeführt. Zur Überprüfung der wirksamen Verblindung der 34 Versuchsteilnehmer wurde der James Blinding Index (BI) bestimmt. Der Wert von 0.78 (95% CI: 0.68; 0.87) bestätigt eine wirksame Verblindung.

X.1.2 Visuelle Analogskalen

Es wurden Visuelle Analogskalen eingesetzt, um folgende sechs Dimensionen der Befindlichkeit vor und nach jeder Nacht zu erheben: „Frische“, „Entspannung“, „Wachheit“, „Konzentration“, „Interesse“ und „Ängstlichkeit“. Der Skalenbereich lag zwischen 0 und 100 mm, wobei die positiven Pole für die ersten vier Dimensionen bei 0 mm lagen und die negativen bei 100 mm. Für die Dimensionen Interesse und Ängstlichkeit bedeuteten dagegen niedrige Werte ein geringeres Interesse und eine hohe Ängstlichkeit, während 100 der maximal positiven Ausprägung dieser beiden Befindlichkeiten entsprach. Deskriptive Statistiken für die mittels visueller Analogskalen ermittelten Dimensionen der Befindlichkeit von 30 Versuchspersonen sind in Tab. X.1 getrennt nach dem Testzeitpunkt (abends und morgens) sowie nach der Exposition (Wi-Fi und Sham) dargestellt.

Zu Visuellen Analogskalen gibt es keine allgemein gültigen Referenzwerte, da sie kontext- bzw. situationsabhängig sind. In einer Studie zu Effekten von TETRA-Exposition bei 20-30-jährigen gesunden Männern wurden ebenfalls Visuelle Analogskalen mit denselben Dimensionen eingesetzt und Werte unter einer Sham-Exposition erhoben.

Tab. X.1: Deskriptive Statistiken für erhobene Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren getrennt nach Zeitpunkt der Datenerhebung (abends und morgens) sowie nach Exposition (Wi-Fi und Sham). N = 30 Versuchspersonen.

			Sham				Wi-Fi			
Kontrollfragebogen	Tageszeitpunkt	Parameter	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75
VAS	Abends	Frische	34.3	21.6	33.0	14.0; 50.0	35.9	19.5	36.9	25.5; 51.2
	Morgens	Frische	26.6	19.9	21.6	10.4; 41.9	30.7	16.0	30.0	19.0; 44.0
	Abends	Entspannung	17.4	19.6	8.0	1.2; 26.4	18.7	19.7	11.3	5.9; 25.8
	Morgens	Entspannung	25.1	27.5	14.0	2.6; 36.5	20.5	19.3	16.0	5.7; 30.0
	Abends	Wachheit	41.4	21.3	42.5	21.7; 58.2	45.4	21.9	48.5	32.7; 57.7
	Morgens	Wachheit	28.3	20.2	24.4	16.0; 39.3	32.0	18.9	30.2	19.5; 47.3
	Abends	Konzentration	29.1	19.9	22.5	14.2; 42.8	30.4	19.4	27.3	16.1; 43.7
	Morgens	Konzentration	23.7	20.3	17.8	8.9; 32.5	23.1	14.4	21.8	13.4; 33.8
	Abends	Interesse	67.3	22.3	71.9	56.2; 80.5	70.2	16.6	71.0	56.2; 81.8
	Morgens	Interesse	71.7	18.1	70.0	62.0; 84.3	67.1	19.2	65.4	54.3; 85.6
	Abends	Ängstlichkeit	88.5	13.2	94.0	78.5; 100.0	84.8	21.0	92.5	81.1; 100.0
	Morgens	Ängstlichkeit	80.2	26.6	89.4	67.4; 100.0	82.3	24.2	93.6	70.8; 100.0
PANAS	Abends	Positiver Affekt	26.5	6.6	26.0	22.0; 31.0	26.1	6.6	25.0	22.0; 30.0
	Morgens	Positiver Affekt	27.2	7.2	26.5	22.0; 33.0	25.4	6.8	26.0	20.0; 30.0
	Abends	Negativer Affekt	11.0	2.2	10.0	10.0; 11.0	11.1	2.1	10.5	10.0; 12.0
	Morgens	Negativer Affekt	11.1	1.9	10.0	10.0; 11.0	11.6	2.6	10.5	10.0; 12.0
STAI	Abends	Situationsbedingte Angst	34.5	5.0	34.0	31.0; 38.0	35.3	5.8	35.0	31.0; 40.0
	Morgens	Situationsbedingte Angst	35.1	6.4	34.0	31.0; 39.0	35.4	6.8	33.0	30.0; 40.0
GBB-24	Abends	Erschöpfung	1.6	2.1	1.0	0.0; 3.0	2.1	2.9	1.0	0.0; 3.0
	Morgens	Erschöpfung	1.3	2.1	0.0	0.0; 2.0	1.3	2.3	0.0	0.0; 1.0
	Abends	Magenbeschwerden	0.2	0.6	0.0	0.0; 0.0	0.2	0.6	0.0	0.0; 0.0
	Morgens	Magenbeschwerden	0.1	0.3	0.0	0.0; 0.0	0.3	0.8	0.0	0.0; 0.0
	Abends	Gliederschmerzen	1.1	1.8	0.0	0.0; 1.0	1.3	2.1	0.0	0.0; 2.0
	Morgens	Gliederschmerzen	1.0	1.9	0.0	0.0; 1.0	1.2	2.2	0.0	0.0; 1.0
	Abends	Herzbeschwerden	0.1	0.4	0.0	0.0; 0.0	0.2	0.8	0.0	0.0; 0.0
	Morgens	Herzbeschwerden	0.2	0.6	0.0	0.0; 0.0	0.3	0.8	0.0	0.0; 0.0
	Abends	Beschwerdedruck	3.0	4.0	2.0	0.0; 4.0	3.8	5.1	2.0	0.0; 5.0
	Morgens	Beschwerdedruck	2.7	4.3	1.0	0.0; 3.0	3.1	5.8	1.0	0.0; 2.0

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil

Vergleiche mit nicht publizierten Daten aus dieser Studie ergaben, dass die Teilnehmer der vorliegenden Studie insgesamt etwas positiver gestimmt waren als die Teilnehmer der TETRA-Studie. Dies äußerte sich in einigen statistisch signifikant unterschiedlichen Abend- und Morgenwerten zwischen den beiden Stichproben (siehe Abb. X.1).

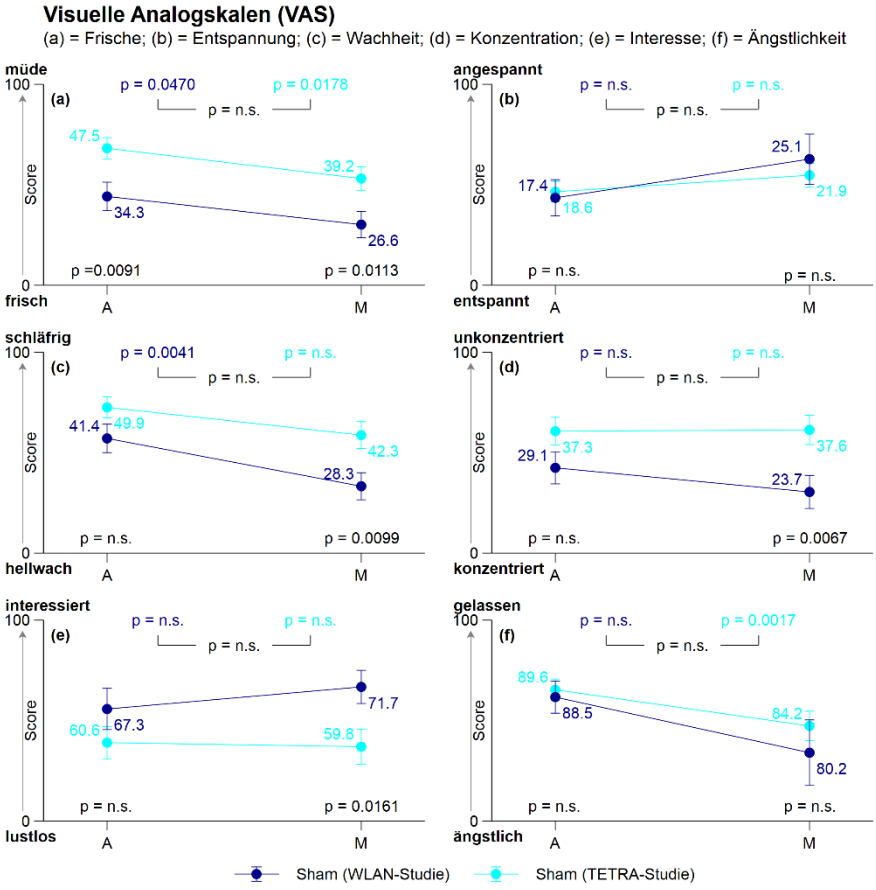


Abb. X.1: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition Daten sind angegeben als MW ± SE; A = abends; M = morgens.

Für die Dimensionen „Frische“, „Entspannung“, „Wachheit“ und „Ängstlichkeit“ konnten in beiden Studien ähnlich verlaufende Entwicklungen zwischen den Tageszeitpunkten beobachtet werden, wobei diese Unterschiede nicht immer statistisch signifikant waren (z.B. für die Dimension „Wachheit“; siehe Abb. X.1). Entgegengesetzt verlaufende Veränderungen über Nacht zwischen den beiden Studien konnten dagegen für keine der sechs untersuchten Dimensionen gefunden werden (siehe Abb. X.1).

Eine Erklärung für diese zum Teil abweichenden Ergebnisse zwischen den Studien könnte sein, dass in der TETRA-Studie junge Männer teilgenommen hatten, die einem Beruf mit Sicherheitsaufgaben nachgingen (überwiegend handelte es sich bei den Teilnehmern um Polizisten). Viele der Teilnehmer an

der TETRA-Studie hatten damals ihren Beruf als sehr anstrengend wahrgenommen. Dieses Empfinden spiegelt sich in den Scores zu den Dimensionen „Frische“, „Wachheit“, „Konzentration“ und „Interesse“ wider, die allesamt im Vergleich negativer eingeschätzt wurden. Weiterhin könnten die abweichenden Ergebnisse durch unterschiedliche Verfahren bei der Datenerhebung begründet sein. Während die Visuellen Analogskalen in der TETRA-Studie per Hand ausgefüllt wurden, fand die Bearbeitung der Fragebögen in der vorliegenden Studie am PC statt.

Univariate Vergleiche zwischen den VAS-Scores am Abend und am Morgen getrennt nach Expositionsbedingung ergaben statistisch signifikante Unterschiede für die Dimension „Wachheit“ unter beiden Expositionsbedingungen sowie für die Dimension „Frische“ unter der Sham- und für die Dimension „Konzentration“ unter der Wi-Fi-Expositionsbedingung (siehe Abb. X.2).

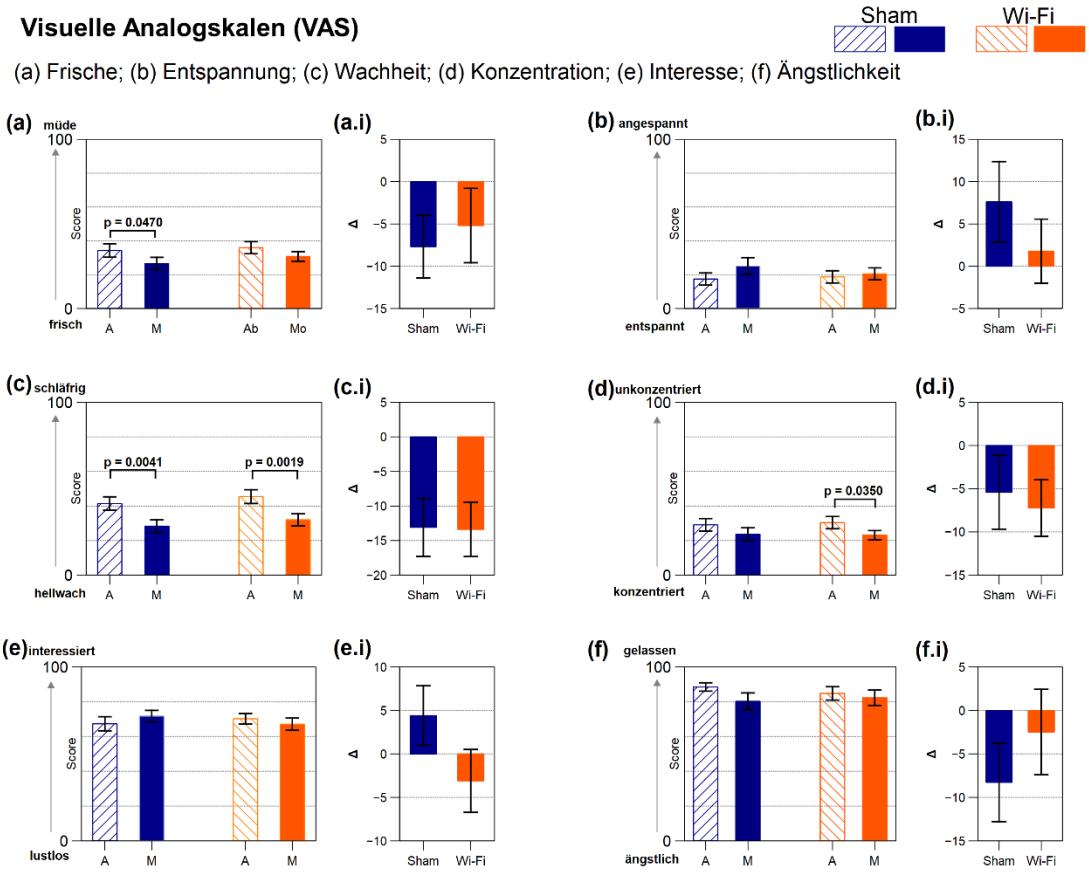


Abb. X.2: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den in den Studiennächten mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten. (a-f): VAS-Scores am Abend (A) und Morgen (M) zu der jeweiligen Dimension getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.-f.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens“ minus „abends“) des VAS-Scores zu der jeweiligen Dimension getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

In allen Fällen war der jeweilige Score am Morgen kleiner als am Abend, was für die betroffenen Dimensionen bedeutete, dass das jeweilige Empfinden positiver eingeschätzt wurde (Probanden fühlten sich frischer, wacher und konzentrierter am Morgen im Vergleich zum Abend; siehe Abb. X.2).

Wie Tab. X.2 zu entnehmen ist, zeigte keine der mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten signifikante Variationen in Abhängigkeit von der EXPOSITIONSABFOLGE. Ebenso war der Innersubjektfaktor EXPOSITION für keine der sechs Befindlichkeiten signifikant. Es gab auch keine signifikanten Interaktionen zwischen den Faktoren EXPOSITION und ZEIT. Lediglich der Innersubjektfaktor ZEIT war für die Befindlichkeiten Frische und Wachheit statistisch signifikant. Für beide Befindlichkeiten waren die über beide Expositionsbedingungen gemittelten Werte am Morgen kleiner als am Abend, was einer Zunahme der Wachheit und des Frischeempfindens über Nacht entsprach (Abb. X.3). Dieser unabhängig von der Exposition aufgetretene Effekt ist zu erwarten gewesen und spiegelt die subjektiv wahrgenommenen positiven Auswirkungen von Schlaf wider.

Tab. X.2: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 30 Versuchspersonen.

	Frische				Entspannung			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.00	0.9987	0.000	0.000	0.04	0.8411	0.001	0.001
Exposition	1.48	0.2343	0.050	0.004	0.35	0.5616	0.012	0.002
Zeit	5.98	**0.0210**	0.176	0.034	3.30	0.0802	0.105	0.014
Exposition*Zeit	0.18	0.6729	0.006	0.001	0.87	0.3588	0.030	0.005

	Wachheit				Konzentration			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.16	0.6908	0.006	0.004	0.12	0.7299	0.004	0.003
Exposition	2.36	0.1356	0.078	0.007	0.01	0.9211	0.000	0.000
Zeit	13.78	**0.0009**	0.330	0.101	3.59	0.0685	0.114	0.027
Exposition*Zeit	0.01	0.9114	0.000	0.000	0.23	0.6343	0.008	0.001

	Interesse				Ängstlichkeit			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.02	0.8876	0.001	0.000	0.07	0.7908	0.002	0.001
Exposition	0.03	0.8648	0.001	0.000	0.06	0.8115	0.002	0.000
Zeit	0.06	0.8013	0.002	0.000	3.06	0.0913	0.099	0.017
Exposition*Zeit	2.54	0.1222	0.083	0.009	0.42	0.5219	0.015	0.003

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

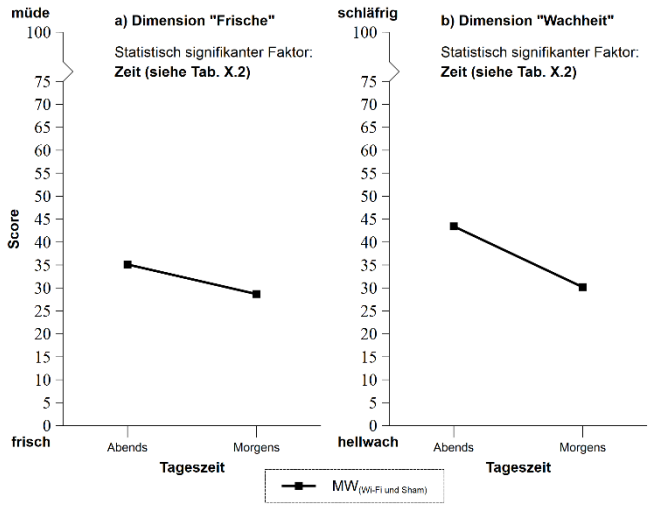


Abb. X.3: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT für die Dimensionen „Frische“ und „Wachheit“.

X.1.3 Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)

Zur Überprüfung eines möglichen Einflusses einer Wi-Fi-Exposition auf positive und/oder negative Gefühle bzw. Stimmungen wurde jeweils am Abend und am Morgen die in Kap VII.2.3 beschriebene PANAS eingesetzt, mit der der jeweils aktuelle Gefühlszustand beschrieben wird. Die in dieser Studie in der Sham-Messnacht erhobenen Abend- und Morgen-Scores sind in Tab. X.1 aufgelistet. Wie Abb. X.4 zu entnehmen ist, stimmen die erzielten Werte für die positive Komponente zu beiden Testzeitpunkten sehr gut mit dem von Krohne et al. (1996) weder nach Alter noch nach Geschlecht differenzierten Referenzwert überein. Die Werte für die negative Komponente waren dagegen sowohl am Abend als auch am Morgen deutlich kleiner als der publizierte Referenzwert, was bedeutet, dass die Teilnehmer der vorliegenden Studie insgesamt eine geringere negative Affektivität aufwiesen. Eine vergleichbar geringe negative Affektivität konnte auch bei den jungen gesunden Männern aus der TETRA-Studie beobachtet werden (Daten bisher nicht publiziert; Abb. X.4). Die Werte zum positiven Affekt unterschieden sich jedoch zwischen den Studien. Die Teilnehmer aus der vorliegenden Studie schätzten sich zu beiden Tageszeiten positiver gestimmt ein als die Teilnehmer aus der TETRA-Studie. Zusätzlich verlief die Änderung des Scores über Nacht in den beiden Studien in entgegengesetzte Richtungen, weswegen der Unterschied am Morgen auch statistisch signifikant war (Abb. X.4).

Wie für die Visuellen Analogskalen könnte auch die zwischen den Studien beobachtete Abweichung bei der positiven Affektivität durch die unterschiedliche berufliche Tätigkeit und die damit einhergehende unterschiedlich stark ausgeprägte körperliche und geistige Belastung der Probanden beider Studien erklärt werden. Die für beide Studien im Vergleich zum Referenzwert beobachteten Abweichungen im

negativen Affekt könnten dagegen in unterschiedlichen Kriterien für die Auswahl der Stichprobe begründet sein. Während sowohl in der TETRA- als auch in der vorliegenden Studie durch ein umfangreiches Screeningprogramm sichergestellt wurde, dass ausschließlich gesunde Personen teilgenommen hatten, sind von Krohne et al. (1996) keine ausführlichen Informationen zur Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der Referenzwertstichprobe berichtet worden.

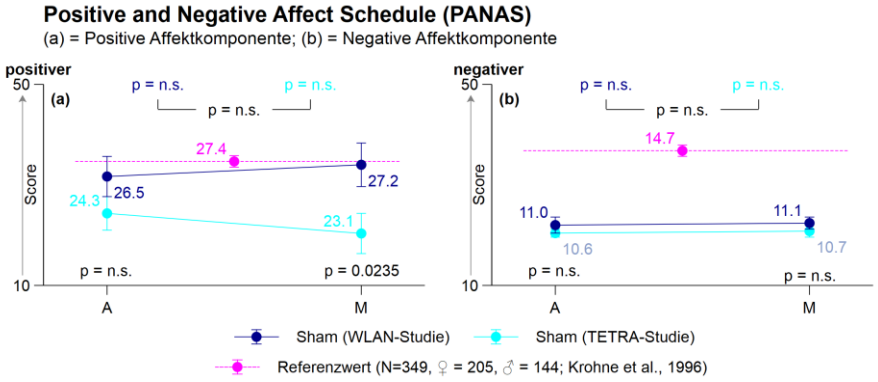


Abb. X.4: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition Daten sind angegeben als MW ± SE; A = abends; M = morgens.

Eine univariate Auswertung der positiven und negativen Affektkomponente zwischen den Tageszeitpunkten ergab für keine der beiden Expositionsbedingungen einen statistisch signifikanten Unterschied (Abb. X.5).

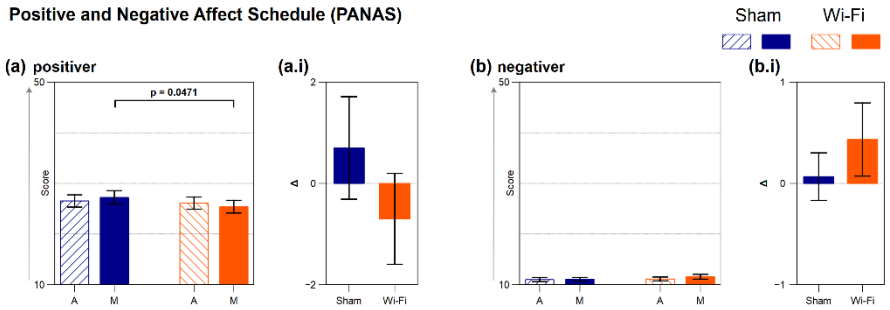


Abb. X.5: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten. (a-b): PANAS-Scores am Abend (A) und am Morgen (M) zu der jeweiligen Komponente getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.-b.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens“ minus „abends“) des PANAS-Scores zu der jeweiligen Komponente getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

Da jedoch der positive Affekt unter der Sham-Exposition über Nacht zunahm und unter der Wi-Fi-Exposition abnahm, waren die Scores am Morgen zwischen den beiden Expositionsbedingungen statistisch signifikant verschieden (Abb. X.5).

Wie den in Tab. X.3 zusammengestellten Ergebnissen zu entnehmen ist, ließen sich weder für den Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE noch für die Innersubjektfaktoren EXPOSITION und ZEIT sowie deren Interaktion signifikante Effekte beobachten.

Tab. X.3: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. N = 30 Versuchspersonen.

	Positiver Affekte				Negativer Affekt			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	P	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.03	0.8653	0.001	0.001	0.05	0.8227	0.002	0.001
Exposition	2.73	0.1093	0.089	0.005	3.35	0.0778	0.107	0.005
Zeit	0.01	0.9318	0.000	0.000	1.32	0.2603	0.045	0.004
Exposition*Zeit	1.49	0.2318	0.051	0.003	1.12	0.2987	0.038	0.002

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

X.1.4 Stait-Trait-Angstinventar (STAI)

Angst als situationsbedingter Zustand wurde abends und morgens mit dem in Kap. VIII.2.4. beschriebenen STAI erhoben. Die nach Messzeitpunkt und Intervention differenzierten deskriptiven Statistiken finden sich in Tab. X.1. In Abb. X.6a sind die beobachteten Werte unter der Sham-Exposition zusammen mit den bisher nicht publizierten Sham-Werten aus der TETRA-Studie und dem von Laux et al. (1981) berichteten Referenzwert für 15-29-jährige Männer graphisch dargestellt. Im Wesentlichen sind die ermittelten Werte in den beiden Studien zu beiden Tageszeitpunkten vergleichbar. Entsprechend sind auch die Veränderungen über Nacht sehr ähnlich. Im Vergleich zum Referenzwert sind die in den beiden Studien ermittelten Werte etwas kleiner, was für einen weniger stark ausgeprägten situationsbedingten Angstzustand bei den Studienteilnehmern spricht.

Wie für die negative Affektkomponente des PANAS könnten die auch die Abweichungen beim STAI-Score zwischen Studien und Referenzwert durch unterschiedliche Kriterien bei der Auswahl der Stichprobe erklärt werden. Während die Studienteilnehmer allesamt sehr sorgfältig gescreent wurden,

handelt es sich bei der Referenzstichprobe um Personen aus der Allgemeinbevölkerung, bei denen unklar ist, nach welchen Kriterien sie ausgewählt wurden (Laux et al., 1981).

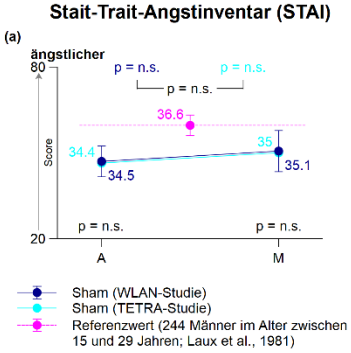


Abb. X.6a: Vergleich der Ergebnisse zu der mittels des State-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. Daten sind angegeben als MW ± SE; A = abends; M = morgens.

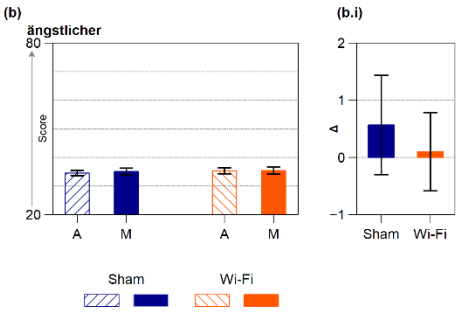


Abb. X.6b: Ergebnisse der univariaten Auswertung von der mittels des State-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente. STAI-Score am Abend (A) und am Morgen (M) getrennt nach Expositionsbedingung, (b.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens" minus „abends") des STAI-Scores getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

Abb. X.6b zeigt die Ergebnisse der univariaten Auswertung des STAI-Scores getrennt nach Expositionsbedingung. Weder die Unterschiede zwischen den Tageszeitpunkten noch der Unterschied zwischen den Veränderungen über Nacht waren statistisch signifikant. Eine varianzanalytische Auswertung ergab ebenfalls, dass keiner der untersuchten Faktoren inklusive der Interaktion EXPOSITION*ZEIT zu signifikanten Variationen führten (Tab. X.4).

Tab. X.4: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von der mittels des Stait-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. N = 30 Versuchspersonen.

	STAI			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.08	0.7778	0.003	0.001
Exposition	1.09	0.3056	0.037	0.005
Zeit	0.24	0.6302	0.008	0.004
Exposition*Zeit	0.05	0.8281	0.002	0.002

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

X.1.5 Gießener Beschwerdebogen (GBB-24)

Der Gießener Beschwerdebogen GBB-24 wurde verwendet, um abends und morgens körperliche Beschwerden zu erfassen (vgl. Kap VIII.2.5). Deskriptive Statistiken zu diesem Test getrennt nach Tageszeitpunkt und Exposition sind Tab. X.1 zu entnehmen. Der GBB-24 zeigte, dass die hier untersuchten Probanden äußerst gesund waren und darum deutlich geringere Beschwerden angegeben hatten als eine bevölkerungsrepräsentative Stichprobe (316 Männer im Alter bis 40 Jahre) aus dem Fragebogenmanual (Brähler et al., 2008; Abb. X.7).

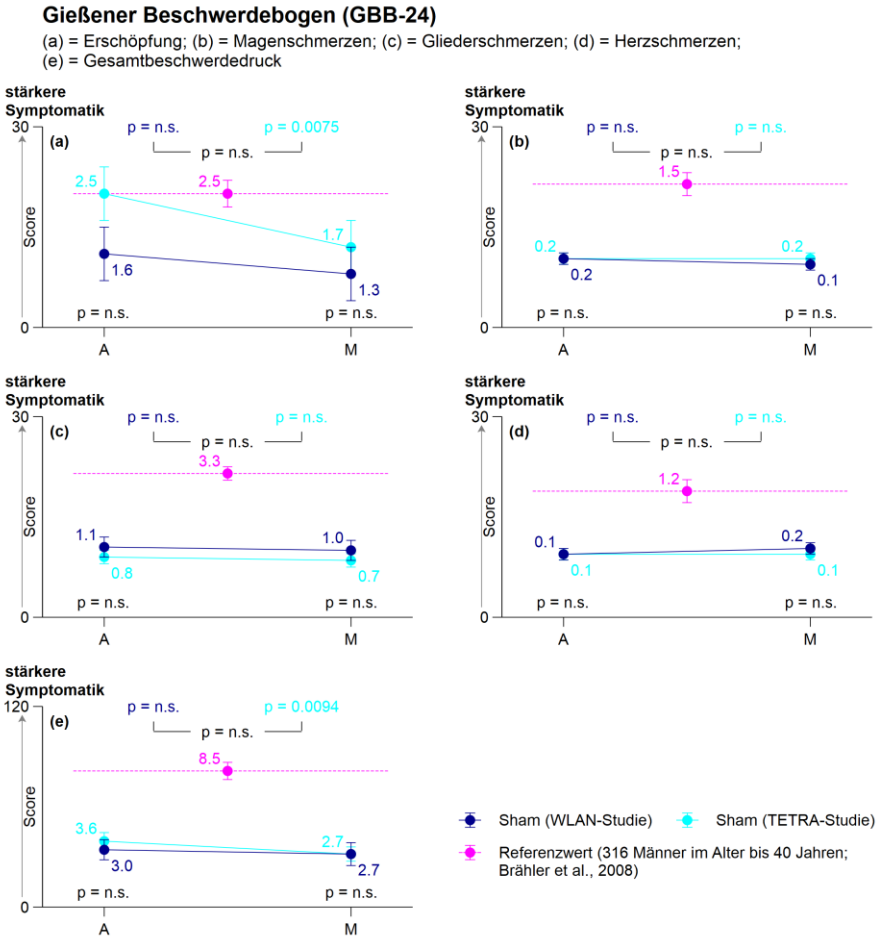


Abb. X.7: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels des Gießener Beschwerdefragebogens erfassten körperlichen Beschwerden zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. Zur übersichtlicheren Darstellung der Ergebnisse wurde auf eine exakte Skalierung der Ordinatenachse verzichtet und nur die Spannweite der Werte angegeben. Zusätzlich kann dadurch auch das Ausmaß der beobachteten körperlichen Beschwerden besser eingeschätzt werden. Daten sind angegeben als MW ± SE; A = abends; M = morgens.

Im Wesentlichen trifft die gleiche Aussage auch auf die Teilnehmer der TETRA-Studie zu, wie die bisher nicht publizierten Daten aus dieser Studie in Abb. X.7 zeigen. Die einzigen beiden Unterschiede zwischen den Studien konnten bei der Einschätzung der Erschöpfung und damit einhergehend auch des Gesamtbeschwerdedrucks am Abend beobachtet werden. Auch wenn diese Abweichungen statistisch nicht signifikant waren, gaben die TETRA-Probanden eine stärker ausgeprägte Erschöpfungs-symptomatik und entsprechend auch einen größeren Gesamtbeschwerdedruck an. Dieses Ergebnis spiegelt sehr wahrscheinlich die stärkere körperliche Belastung im Zusammenhang mit dem ausgeübten Beruf im Bereich der Sicherheitsaufgaben wider. Am Morgen waren die Werte dagegen auch deskriptiv wieder für beide Komponenten vergleichbar. Diese Veränderungen über Nacht waren für beide Komponenten statistisch signifikant. (Abb. X.7).

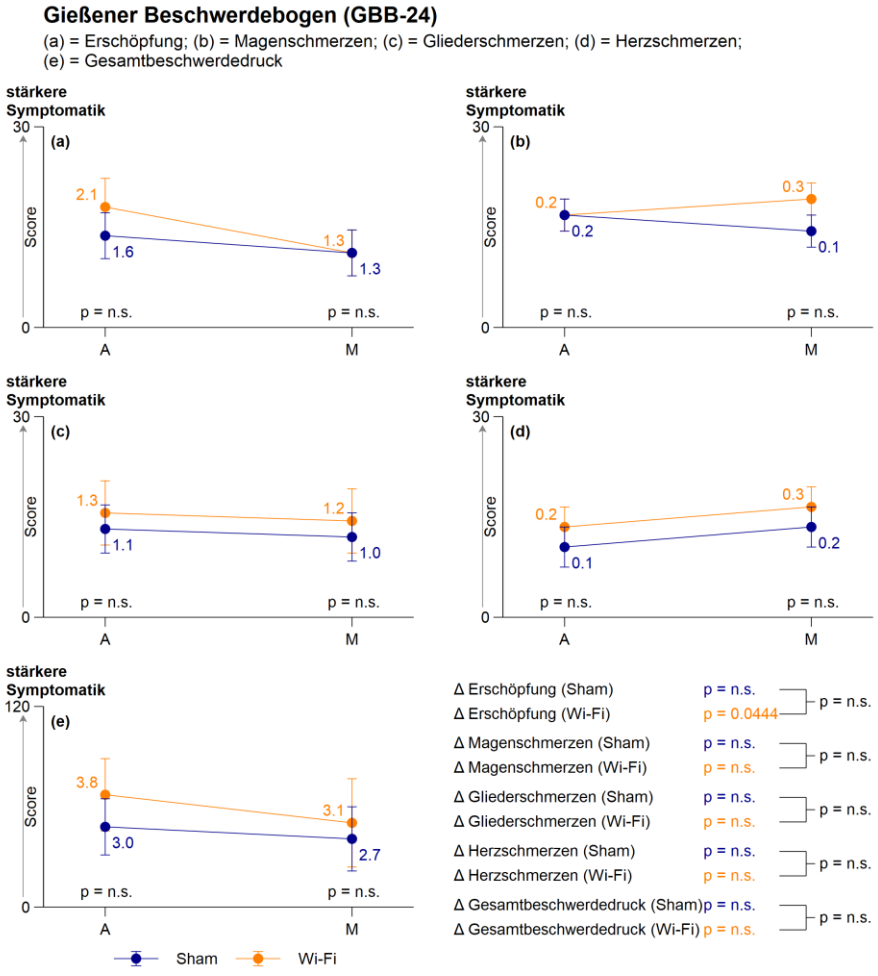


Abb. X.8: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den mittels des Gießener Beschwerdefragebogens erfassten körperlichen Beschwerden. Dargestellt sind die Beschwerde-Scores am Abend (A) und am Morgen (M) getrennt nach Expositionsbedingung. Die Veränderung über Nacht (Δ) entspricht dem Wert am Morgen minus den Wert am Abend. Daten sind angegeben als MW ± SE.

Aufgrund der insgesamt sehr geringen Beschwerdelast bei jungen gesunden Männern war eine Auswertung der Daten mittels ANOVA mit Messwiederholung nicht sinnvoll möglich, weshalb die Daten aus diesem Fragebogen ausschließlich univariat im Hinblick auf Expositions- und Zeiteffekte analysiert und in abweichender Form grafisch dargestellt wurden. Wie Abb. X.8 zu entnehmen ist, wurden weder am Abend noch am Morgen signifikante Unterschiede in den Scores für Erschöpfung, Magenbeschwerden, Gliederschmerzen, Herzbeschwerden sowie für den Gesamtbeschwerdedruck beobachtet, auch wenn der Erschöpfungs-Score am Abend deskriptiv einen größeren Unterschied zwischen den Expositionsbedingungen aufwies (Wert war in der Wi-Fi-Messnacht größer als in der Sham-Messnacht). Während unter Sham keine signifikanten Veränderungen des Beschwerdebildes über Nacht beobachtet werden konnten, zeigte sich unter Wi-Fi-Exposition eine signifikante Abnahme des Ausmaßes der Erschöpfung zwischen der Abend- und Morgentestung. Diese signifikante Veränderung scheint also durch die größere Variation vor Beginn der Exposition am Abend bedingt gewesen zu sein. Ein Vergleich der Veränderungen über Nacht zwischen den Expositionsbedingungen ergab ebenfalls nur statistisch nicht signifikante Ergebnisse. Die signifikante Abnahme der Erschöpfung über Nacht passt inhaltlich zu einer größeren Wachheit und stärker ausgeprägten Frische (beides erfasst mittels VAS) am Morgen.

X.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf die mittels Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren erhobenen Daten zur Befindlichkeit

Die varianzanalytische Auswertung der mit Visuellen Analogskalen und validierten Fragebögen erhobenen Daten zur Befindlichkeit zeigte, dass die Expositionsabfolge, die für diese Ergebnisparameter nicht ganz ausbalanciert war, keinen statistisch signifikanten Einfluss hatte. Ebenso konnte kein statistisch signifikanter Expositionseffekt als Interaktion zwischen den Faktoren EXPOSITION und ZEIT festgestellt werden. Hinsichtlich körperlicher Beschwerden, die lediglich univariat ausgewertet wurden, zeigte sich eine signifikante Abnahme der Erschöpfung über Nacht unter Wi-Fi-Exposition, d.h. nach einer Nacht mit Exposition waren die Probanden morgens signifikant weniger erschöpft als am Abend.

Dies konnte unter der Sham-Exposition nicht beobachtet werden. Das signifikante Ergebnis, das einen positiven Effekt widerspiegelt, wird als Zufallsbefund gewertet, da die Veränderung im Wesentlichen auf eine größere Erschöpfung am Abend (vor der Wi-Fi-Exposition) zurückzuführen ist, während die absoluten Werte am Morgen unter beiden Expositionsbedingungen identisch sind. Diese Ergebnisse stimmen insgesamt sehr gut mit denen aus der TETRA-Studie überein, in der dieselben subjektiven Instrumente zum Einsatz kamen und ebenfalls keine Hochfrequenzexpositionseffekte beobachtet

werden konnten (Danker-Hopfe und Dorn, 2014). Es gibt damit aus unseren Studien keine Hinweise darauf, dass sich eine die gesamte Nacht andauernde Hochfrequenzexposition nachteilig auf die Befindlichkeit und körperliche Beschwerden auswirkt.

X.2 Subjektive und objektive Schlafparameter

X.2.1 Einfluss der Erwartung der Exposition

Um zu überprüfen, ob allein die Erwartung einer möglichen WiFi-Exposition einen Einfluss auf die Schlafqualität hat, wurden die Daten aus den beiden Baselinenächten und aus den beiden Expositionsnächsten gepoolt und auf Unterschiede überprüft. Beim Vergleich subjektiver und objektiver Schlafparameter zwischen den gepoolten Baseline-Nächten und den gepoolten Messnächten zeigte sich, dass die Erwartung eventueller nachteiliger Effekte der EMF-Exposition nicht zu statistisch signifikanten Unterschieden in der subjektiv bestimmten Schlafqualität führen (siehe Tab. X.5). Auch die Schlaf-Makrostruktur war von diesen Erwartungen unbeeinflusst. Wie in Tab. X.5 erkennbar, war der prozentuale Anteil des REM-Schlafes und (sehr wahrscheinlich demzufolge) die Anzahl der Arousals im REM-Schlaf in den Messnächten geringfügig höher im Vergleich zu den Baselinenächten. Die zugehörigen Arousal-Indizes unterschieden sich jedoch nicht.

X.2.2 Baselinenächte

Um mögliche Effekte durch unterschiedliche Bettzeiten oder unterschiedliche Schlafdauer in den Nächten unmittelbar vor den Messnächten zu kontrollieren, wurden diese Nächte von den Versuchsteilnehmern als Baselinenächte im Schlaflabor verbracht. Die TIB wurde wie in den Messnächten auf 480 min festgesetzt. Die Schlafeffizienz in den Baselinenächten vor den Sham-Messnächten betrug im Mittel (Mittelwert ± SD) 91.6 ± 5.4 % und in den Baselinenächten vor den Wi-Fi-Messnächten 91.3 ± 6.9 %. Für beide Expositionsbedingungen gab es demnach in der vorangegangenen Nacht vergleichsweise ausreichend Schlaf [$t(33) = -0.26$; $p = 0.7943$; $d_{av} = -0.05$ (95% CI: -0.40; 0.30)]. Dies drückt sich auch in den subjektiven Gesamtschlafzeiten aus [Baselinenächte vor Sham-Exposition: 454.7 ± 32.6 min, entsprechend einem mittleren SEI von 94.7%; Baselinenächte vor Wi-Fi-Exposition: 463.7 ± 33.3 min, SEI: 96.6%; $t(33) = 1.51$; $p = 0.1415$; $d_{av} = 0.27$ (95% CI: -0.09; 0.63)]. Für jeden Versuchsteilnehmer wurden in den Baseline- und Messnächten individuelle Bettzeiten zwischen 22:35 Uhr und 23:45 Uhr festgelegt, die innerhalb einer Person möglichst konstant gehalten wurden.

Tab. X.5: Deskriptive Statistiken und Vergleiche der Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs sowie der subjektiven Schlafqualität auf der Basis gepoolter Baseline- und Messnächte. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den gepoolten Baselinenächten und den gepoolten Messnächten ($MN_{gepoolt}$ minus $BL_{gepoolt}$). Statistisch signifikante Effekte sind fett markiert. N = 34 Versuchspersonen

		$BL_{gepoolt}$				$MN_{gepoolt}$							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
bezogen auf Schlaf-Wach-Zeiten													
TST	min	438.8	25.1	444.8	423.5; 455.8	438.6	23.8	445.5	431.3; 456.3	-0.04	0.9676	-0.01	-0.29; 0.28
SPT	min	460.4	17.7	465.6	456.8; 471.8	458.6	19.9	462.3	457.5; 471.8	-0.53	0.6019	-0.10	-0.45; 0.26
WASO	min	25.2	21.6	20.8	14.0; 27.8	22.2	13.2	19.9	14.0; 26.8	-1.05	0.3014	-0.17	-0.45; 0.12
WSPT	min	21.6	11.7	19.8	14.0; 24.8	19.9	8.8	19.9	14.0; 24.0	-0.78	0.4438	-0.16	-0.56; 0.24
SEI	%	91.4	5.3	92.6	88.3; 94.9	91.4	4.9	92.8	89.8; 95.0	-0.12	0.9031	-0.02	-0.31; 0.27
bezogen auf Schlaflatenzen													
SOL	min	15.9	11.1	12.8	8.0; 21.5	19.3	14.2	17.9	8.5; 22.5	1.50	0.1442	0.27	-0.09; 0.62
LPS	min	18.7	11.6	16.3	9.8; 24.5	22.3	14.8	21.3	11.0; 26.8	1.50	0.1422	0.27	-0.08; 0.63
RL	min	95.3	45.8	74.0	62.5; 119.0	88.3	27.9	82.3	64.8; 104.8	-0.95	0.3504	-0.19	-0.56; 0.19
N3L	min	20.6	12.3	17.1	13.5; 23.5	19.1	9.0	16.4	13.5; 22.5	-0.69	0.4951	-0.14	-0.53; 0.25
LN2	min	20.2	12.0	17.4	11.5; 25.0	23.0	13.7	23.0	12.5; 26.8	1.21	0.2358	0.22	-0.14; 0.58
LN3	min	36.5	17.1	32.9	25.5; 43.0	38.4	18.1	35.3	24.5; 42.8	0.59	0.5587	0.11	-0.25; 0.47
LR	min	111.2	46.4	87.3	77.8; 134.5	107.6	27.7	100.8	87.0; 129.8	-0.49	0.6289	-0.09	-0.46; 0.27
bezogen auf die Schlafarchitektur													
N1	min	40.7	16.7	36.4	30.3; 49.5	41.7	15.7	40.1	33.3; 45.0	0.55	0.5862	0.06	-0.16; 0.28
N1P	%	9.3	3.9	8.0	6.8; 10.9	9.5	3.7	9.0	7.5; 10.7	0.46	0.6475	0.05	-0.18; 0.28
N2	min	239.3	25.6	237.0	218.0; 256.0	237.8	23.5	234.1	221.5; 258.3	-0.45	0.6552	-0.06	-0.32; 0.20
N2P	%	54.6	5.7	55.8	49.9; 58.3	54.3	5.1	55.0	51.9; 58.1	-0.63	0.5317	-0.07	-0.28; 0.14
N3	min	68.1	29.5	69.8	45.0; 92.8	64.1	27.6	62.5	40.3; 87.3	-1.66	0.1066	-0.14	-0.31; 0.03
N3P	%	15.5	6.5	15.9	9.9; 20.3	14.5	6.0	14.8	9.0; 19.7	-1.81	0.0792	-0.15	-0.32; 0.02
R	min	90.6	22.0	94.0	77.3; 103.8	95.0	23.5	95.0	75.8; 115.5	1.80	0.0816	0.19	-0.02; 0.40
RP	%	20.5	4.8	21.5	17.2; 23.7	21.6	5.2	21.6	17.3; 25.8	2.12	**0.0412**	0.22	0.01; 0.43
bezogen auf die Schlafkontinuität inklusive Arousal													
AWA-N	#	20.4	5.9	20.5	16.0; 25.0	20.5	6.1	20.3	16.0; 24.0	0.05	0.9581	0.01	-0.27; 0.28
AWA-I	#	2.8	0.9	2.8	2.1; 3.3	2.8	0.9	2.7	2.1; 3.4	-0.12	0.9043	-0.02	-0.28; 0.25
SSS-N	#	147.1	28.5	143.5	133.5; 157.5	150.3	30.2	143.8	137.0; 166.5	0.95	0.3473	0.11	-0.12; 0.34
SSS-I	#	20.2	4.3	19.7	18.0; 22.0	20.7	4.5	19.9	18.5; 22.5	0.92	0.3644	0.10	-0.12; 0.32
AR-N	#	89.3	33.9	78.0	66.5; 106.5	92.5	37.0	83.0	68.5; 113.5	1.00	0.3255	0.09	-0.09; 0.26
ARNR-N	#	72.0	29.9	59.8	51.5; 86.0	73.0	30.4	67.5	52.5; 83.0	0.37	0.7120	0.04	-0.15; 0.22
ARR-N	#	17.4	16.2	11.3	7.0; 20.5	19.5	16.9	13.5	6.5; 27.0	2.11	**0.0421**	0.13	0.01; 0.25
AR-I	#	12.3	4.8	10.8	8.9; 15.2	12.7	5.2	11.4	9.4; 15.3	0.87	0.3897	0.08	-0.10; 0.25

		$BL_{gepoolt}$				$MN_{gepoolt}$							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
ARNR-I	#	12.5	5.4	10.2	8.9; 14.9	12.8	5.5	12.0	9.2; 15.7	0.74	0.4642	0.07	-0.11; 0.24
ARR-I	#	10.8	7.8	8.9	5.1; 14.0	11.8	8.3	9.8	4.8; 15.9	1.65	0.1092	0.12	-0.02; 0.26
bezogen auf die subjektive Schlafqualität													
sSOL	min	14.1	8.1	12.5	8.0; 20.0	14.9	8.6	12.5	10.0; 17.5	0.54	0.5938	0.09	-0.24; 0.43
sAWA	#	2.3	1.8	2.0	1.0; 2.8	1.9	1.6	1.8	0.5; 3.0	-1.90	0.0666	-0.24	-0.49; 0.01
sWASO	min	14.4	23.5	8.0	3.5; 15.0	12.9	17.0	7.3	2.0; 15.0	-0.62	0.5413	-0.07	-0.28; 0.14
sTST	min	459.2	28.0	465.0	435.0; 480.0	459.6	23.7	467.5	442.5; 480.0	0.09	0.9277	0.01	-0.29; 0.32

BL = Baselinenächte; MN = Messnächte; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzinterval.

X.2.3 Subjektive Schlafparameter

Um die in der vorliegenden Studie unter der Sham-Bedingung erzielten subjektiven Daten zum Schlaf besser einordnen zu können, wurden sie in einem ersten Schritt mit entsprechenden Sham-Werten aus der TETRA-Studie verglichen. Aus Abb. X.9 wird deutlich, dass die Teilnehmer der beiden Studien ihren Schlaf unterschiedlich einschätzten. Die TETRA-Probanden gaben im Mittel eine statistisch signifikant kürzere Wachzeit nach Schlafbeginn und eine statistisch signifikant längere Gesamtschlafzeit an. Dieser Unterschied könnte darin begründet liegen, dass die Nächte im Schlaflabor von den TETRA-Probanden insgesamt als sehr positiv wahrgenommen wurden, da sie in diesen Nächten die Möglichkeit hatten, länger zu schlafen als beruflich bedingt unter der Woche zu Hause. Bei den Probanden der vorliegenden Studie könnten dagegen die ungewohnten Laborbedingungen auf die subjektive Einschätzung des Schlafs störend eingewirkt haben. Allerdings zeigte sich dieser Effekt nicht bei der Einschätzung zur Erholsamkeit des Schlafs. Die Verteilung der drei möglichen Ausprägungen war in der Sham-Nacht der vorliegenden Studie fast identisch mit der aus der individuellen ersten Sham-Nacht der TETRA-Studie [X(2) = 0.22, p = 0.8952]. Möglicherweise war der Fragebogen zur Einschätzung der Erholsamkeit des Schlafs nicht differenziert genug, um Unterschiede zwischen den Studien aufdecken zu können.

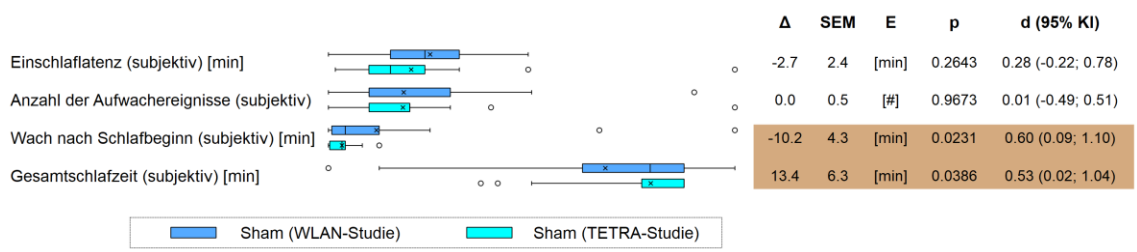


Abb. X.9: Vergleich der Ergebnisse zu den subjektiven Schlafparametern zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. Statistisch signifikante Ergebnisse sind braun unterlegt. Δ = Differenz „Daten der TETRA-Studie“ minus „vorliegende Daten“; SEM = Standardfehler; E = Einheit; p = Signifikanzwert; d = Cohen’s d [|d| < 0.2: kein Effekt, 0.2 ≤ |d| < 0.5: kleiner Effekt, 0.5 ≤ |d| < 0.8: mittlerer Effekt, |d| ≥ 0.8: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzintervall.

T-Tests für gepaarte Beobachtungen zeigten, dass es keine signifikante Veränderung der subjektiven Schlafparameter durch eine Wi-Fi-Exposition während der gesamten Nacht gab (siehe Tab. X.6a). Der Stuart-Maxwell-Test zeigte darüber hinaus, dass die Exposition keinen signifikanten Effekt auf die allgemeine Selbsteinschätzung der Erholsamkeit des Schlafes hatte (siehe Tab. X.6b), d.h. die individuellen Antworten zeigten nach Sham- wie nach Wi-Fi-Exposition das gleiche Muster (siehe Abb. X.10).

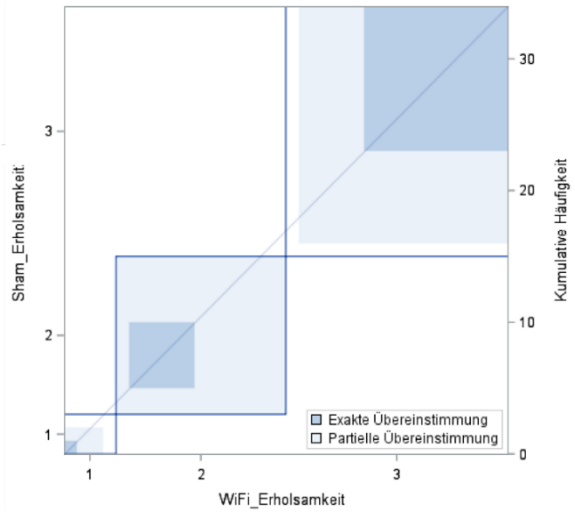


Abb. X.10: Visualisierung der Übereinstimmung hinsichtlich der Einschätzung der Erholsamkeit des Schlafes nach Wi-Fi und Sham-Expositionsbedingung.

X.2.4 Makrostruktur des Schlafs

Ein Vergleich der hier beobachteten Variablen zur Charakterisierung der Makrostruktur des Schlafes unter der Sham-Exposition mit entsprechenden Daten aus der TETRA-Studie ist in Abb. X.11 dargestellt. Die Auswertung hat einige Unterschiede zwischen den Studien aufgezeigt. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Probanden der TETRA-Studie besser geschlafen haben als die der vorliegenden Studie. Dies könnte einerseits zu der Erklärung passen, die bereits zu den subjektiven Einschätzungen des Schlafs postuliert wurde (s.o.). Andererseits könnte diese Abweichungen aber auch dadurch bedingt sein, dass in der vorliegenden Studie der Schlaf visuell gescort wurde, während dies in der TETRA-Studie mittels einer automatischen Auswertesoftware (Somnolyzer 24x7) erfolgte. Unabhängig vom Scoring-Standard ist die Übereinstimmung von Somnolyzer-Scorings mit visuell gescorten Schlafstadien vergleichbar mit der Übereinstimmung von Experten-Scorings aus unterschiedlichen Schlaflaboren (Anderer et al., 2005; Anderer et al., 2010). Die beobachteten Abweichungen könnten aber auch durch die geringere Anzahl der im Labor verbrachten Nächte erklärt werden. Während die Probanden in der vorliegenden Studie fünf Nächte im Labor verbrachten und eine davon eine Sham-Nacht war, schliefen die TETRA-Probanden zehnmal im Labor, wovon drei Nächte unter Sham-Bedingungen abgeleitet wurden. Dementsprechend könnten die positiveren Ergebnisse aus der TETRA-Studie auch die bessere Gewöhnung an die Schlaflaborumgebung widerspiegeln.

Tab. X.7 zeigt, dass die Outcome-Parameter zur Makrostruktur des Schlafes keinen signifikanten Unterschied zwischen den Expositionsbedingungen aufwiesen. Weiterhin deuteten die meisten der

Cohen's d_{av} Schätzwerte darauf hin, dass kein Effekt vorlag ($|d_{av}| < 0.2$ für 20 der 24 Variablen). Die |dav| Schätzwerte der vier anderen Variablen zeigten kleine Effekte bis zu einem Höchstwert von 0.28 an. Kleine, aber nicht signifikante Effekte wurden für SPT (länger unter Wi-Fi-Exposition), LPS (kürzer unter Wi-Fi-Exposition) sowie für das Schlafstadium N1 (in min und % der TST, größer unter Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham) beobachtet. Eine Visualisierung der individuellen Hypnogramme lässt keinen systematischen Effekt der Exposition auf den Schlaf erkennen (vgl. Abb. X.12). Während es nach den statistischen Analysen der Outcome-Parameter zur Makrostruktur des Schlafes in der ersten Nachthälfte insgesamt keine signifikanten Ergebnisse gab, war für die zweite Nachthälfte die Dauer des Schlafstadiums N1 (in min) unter Wi-Fi-Exposition erhöht (siehe Tab. X.8 und X.9).

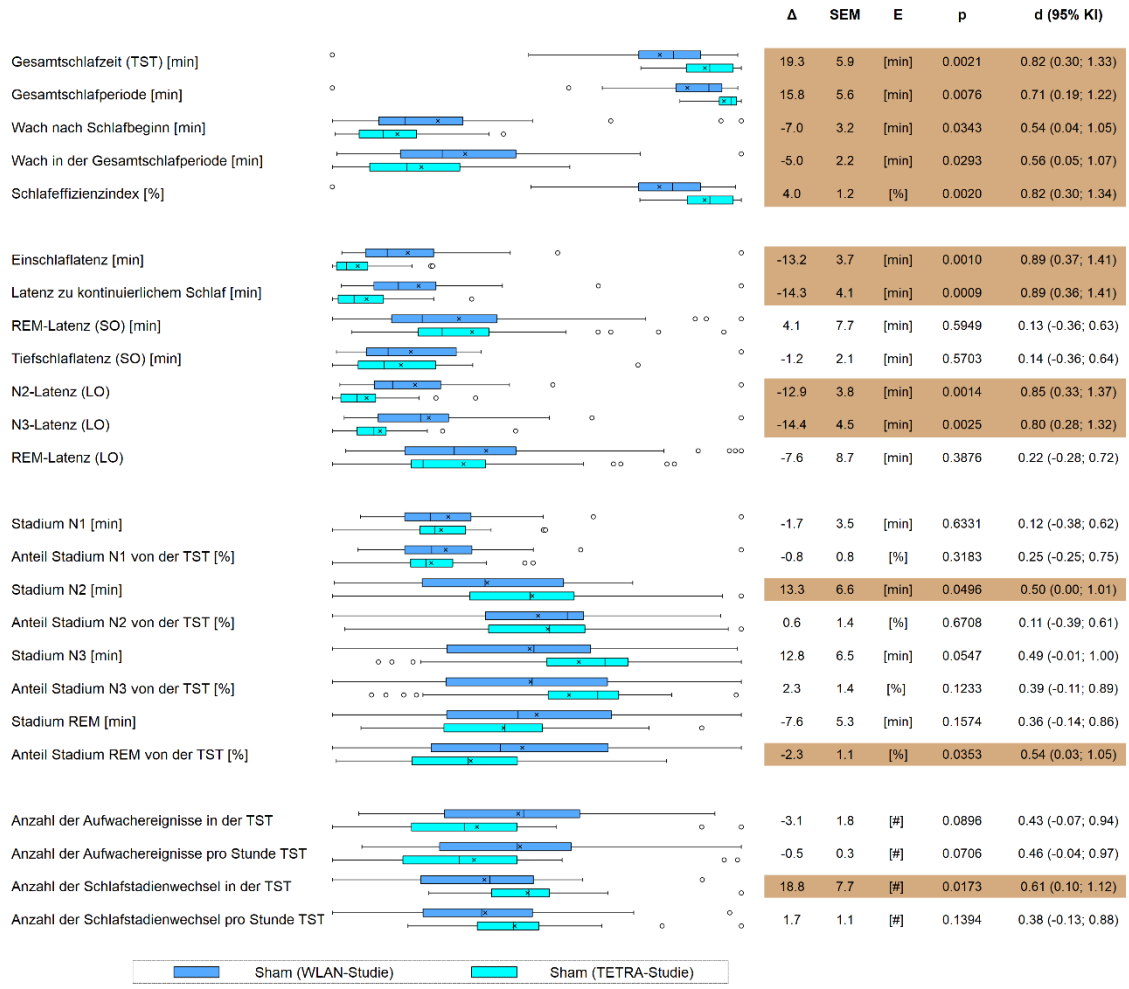


Abb. X.11: Vergleich der Ergebnisse zu der Makrostruktur des Schlafs zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. Statistisch signifikante Ergebnisse sind braun unterlegt. Δ = Differenz „Daten der TETRA-Studie" minus „vorliegende Daten"; SEM = Standardfehler; E = Einheit; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d [|d| < 0.2: kein Effekt, 0.2 ≤ |d| < 0.5: kleiner Effekt, 0.5 ≤ |d| < 0.8: mittlerer Effekt, |d| ≥ 0.8: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzintervall.

Tab. X.6a: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die subjektive Schlafqualität. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den Wi-Fi- und den Sham-Messnächten (Wi-Fi minus Sham). N = 34 Versuchspersonen

		Sham				Wi-Fi							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
bezogen auf die subjektive Schlafqualität													
sSOL	min	15.8	8.9	15.0	10.0; 20.0	13.9	10.2	10.0	5.0; 20.0	-1.27	0.2122	-0.19	-0.49; 0.11
sAWA	#	1.9	1.9	1.0	1.0; 3.0	2.0	1.5	2.0	1.0; 3.0	0.83	0.4135	0.10	-0.13; 0.34
sWASO	min	14.2	24.6	5.0	1.0; 15.0	11.6	13.1	6.5	1.0; 20.0	-0.75	0.4605	-0.13	-0.44; 0.18
sTST#	min	456.8	31.5	470.0	450.0; 480.0	462.7	22.9	480.0	450.0; 480.0	1.18	0.2459	0.22	-0.12; 0.55

= t(32) aufgrund fehlender Daten eines Studienteilnehmers; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzinterval.

Tab. X.6b: Kreuztabelle zu den subjektiv erfassten Daten zur Erholsamkeit des Schlafs. N = 34 Versuchspersonen

			Sham				
Parameter Erholsamkeit			Sehr erholsam	Ziemlich erholsam	Mittelmäßig erholsam	Summe	
	Wi-Fi	Sehr erholsam	1	2	1	4	Q(2) = 0.39, p = 0.8212
		Ziemlich erholsam	1	5	7	13	
		Mittelmäßig erholsam	1	5	11	17	
		Summe	3	12	19	34	

Q = Teststatistik; p = Signifikanzwert.

Tab. X.7: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den Wi-Fi- und den Sham-Messnächten (Wi-Fi minus Sham). N = 34 Versuchspersonen.

		Sham				Wi-Fi							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
bezogen auf Schlaf-Wach-Zeiten													
TST	min	436.6	31.6	442.5	427.5; 454.5	440.6	24.8	446.8	428.0; 458.5	0.75	0.4567	0.14	-0.23; 0.51
SPT	min	455.7	31.5	465.0	450.5; 471.0	461.4	14.8	467.0	455.0; 472.5	1.15	0.2592	0.23	-0.14; 0.61
WASO	min	22.7	16.5	17.0	12.5; 27.0	21.7	14.7	17.0	12.5; 27.0	-0.33	0.7401	-0.06	-0.43; 0.30
WSPT	min	19.1	10.5	16.5	11.5; 25.0	20.8	13.8	17.0	12.5; 25.5	0.58	0.5654	0.14	-0.33; 0.61
SEI	%	90.9	6.6	92.1	89.1; 94.7	91.8	5.2	93.3	89.2; 95.3	0.79	0.4351	0.15	-0.22; 0.51
bezogen auf Schlaflatenzen													
SOL	min	20.9	20.2	15.5	9.5; 28.0	17.7	13.9	13.3	7.5; 24.5	-0.95	0.3473	-0.19	-0.57; 0.19
LPS	min	24.8	21.3	19.3	12.5; 30.0	19.8	14.6	18.0	8.5; 25.0	-1.39	0.1753	-0.28	-0.67; 0.11
RL	min	86.8	34.0	75.3	65.5; 100.5	89.8	44.9	76.8	61.5; 94.5	0.31	0.7604	0.08	-0.41; 0.56
N3L	min	19.5	9.1	16.8	14.0; 25.5	18.7	12.7	16.0	12.0; 20.5	-0.37	0.7150	-0.07	-0.47; 0.32
LN2	min	24.5	19.9	18.5	13.5; 32.0	21.6	13.6	18.3	11.0; 28.0	-0.84	0.4096	-0.17	-0.56; 0.23
LN3	min	40.4	23.4	38.0	25.5; 46.5	36.4	18.9	32.8	21.5; 41.0	-1.06	0.2986	-0.19	-0.55; 0.16
LR	min	107.7	38.8	97.0	79.5; 118.0	107.5	46.0	89.3	80.0; 113.5	-0.02	0.9821	-0.01	-0.52; 0.50
bezogen auf die Schlafarchitektur													
N1	min	39.6	16.9	35.5	29.5; 45.0	43.8	16.7	38.5	34.5; 51.5	2.01	0.0523	0.25	0.00; 0.49
N1P	%	9.1	4.0	8.3	6.8; 10.6	10.0	3.8	9.0	8.0; 11.7	1.94	0.0607	0.22	-0.01; 0.45
N2	min	236.6	25.6	236.0	216.5; 259.5	239.1	28.6	247.0	216.0; 259.5	0.53	0.6028	0.09	-0.25; 0.43
N2P	%	54.3	5.7	56.2	50.9; 57.3	54.2	5.4	55.0	50.5; 58.5	-0.16	0.8766	-0.02	-0.28; 0.24
N3	min	63.4	28.0	64.5	41.5; 79.5	64.9	28.8	61.3	43.0; 87.0	0.64	0.5257	0.05	-0.11; 0.21
N3P	%	14.4	6.2	14.5	9.4; 19.4	14.6	6.2	14.3	9.7; 19.7	0.37	0.7165	0.03	-0.13; 0.19
R	min	97.0	25.1	92.8	76.0; 115.5	92.9	25.7	91.8	79.5; 114.5	-1.24	0.2228	-0.16	-0.41; 0.10
RP	%	22.1	5.2	21.1	17.8; 26.0	21.2	6.0	21.7	17.4; 26.4	-1.35	0.1851	-0.17	-0.41; 0.08
bezogen auf die Schlafkontinuität													
AWA-N	#	20.1	7.5	20.5	14.0; 25.0	20.9	6.0	20.0	16.0; 26.0	0.76	0.4517	0.12	-0.18; 0.41
AWA-I	#	2.8	1.1	2.8	1.9; 3.3	2.9	0.9	2.7	2.2; 3.4	0.54	0.5935	0.08	-0.21; 0.37
SSS-N	#	150.2	32.8	152.5	122.0; 172.0	150.4	34.4	146.5	126.0; 171.0	0.05	0.9634	0.01	-0.29; 0.30
SSS-I	#	20.8	4.9	20.6	17.0; 23.7	20.5	4.9	19.9	17.1; 23.2	-0.35	0.7258	-0.05	-0.31; 0.21

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzinterval.

Tab. X.8: Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs während der 1. Nachthälfte. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den Wi-Fi- und den Sham-Messnächten (Wi-Fi minus Sham). N = 34 Versuchspersonen.

		Sham				Wi-Fi							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
bezogen auf Schlaf-Wach-Zeiten													
TST	min	210.9	21.0	214.8	202.0; 225.5	212.6	23.4	219.0	204.0; 227.5	0.39	0.6974	0.08	-0.31; 0.47
WSPT	min	8.2	6.3	6.8	4.0; 11.5	9.6	12.7	6.5	4.0; 10.0	0.58	0.5629	0.14	-0.34; 0.62
SEI	min	87.9	8.7	89.4	84.3; 94.0	88.6	9.7	91.3	85.0; 94.8	0.41	0.6839	0.08	-0.31; 0.47
bezogen auf die Schlafarchitektur													
N1	min	17.6	10.3	14.8	11.5; 20.5	18.1	11.6	16.5	10.5; 21.5	0.29	0.7739	0.04	-0.23; 0.31
N1P	%	8.5	5.1	7.0	5.5; 9.6	8.7	5.6	7.6	4.9; 10.6	0.25	0.8023	0.04	-0.23; 0.30
N2	min	109.8	23.1	111.8	89.0; 122.5	112.8	26.1	115.0	101.5; 129.5	0.65	0.5180	0.12	-0.24; 0.48
N2P	%	52.2	9.8	52.6	46.2; 55.7	52.9	10.6	54.1	46.4; 60.0	0.44	0.6630	0.07	-0.24; 0.37
N3	min	55.5	23.8	58.3	35.5; 71.0	58.4	24.6	53.5	42.5; 76.0	1.52	0.1385	0.12	-0.04; 0.28
N3P	%	26.1	10.5	27.1	19.0; 33.7	27.5	11.2	26.0	20.9; 36.2	1.28	0.2104	0.13	-0.07; 0.33
R	min	27.9	12.2	26.3	19.0; 39.0	23.3	15.0	22.8	10.0; 34.5	-1.82	0.0771	-0.33	-0.70; 0.03
RP	%	13.2	5.9	12.0	8.5; 17.4	10.9	7.1	10.4	4.9; 15.8	-1.95	0.0603	-0.35	-0.71; 0.01
bezogen auf die Schlafkontinuität													
AWA-N	#	8.2	3.8	7.0	5.0; 11.0	8.0	3.9	7.0	5.0; 11.0	-0.26	0.7982	-0.05	-0.46; 0.35
AWA-I	#	2.4	1.2	2.2	1.6; 3.1	2.3	1.3	1.9	1.5; 3.2	-0.13	0.8958	-0.03	-0.44; 0.38
SSS-N	#	78.5	19.3	75.5	67.0; 93.0	75.6	25.6	76.0	57.0; 89.0	-0.79	0.4352	-0.13	-0.44; 0.18
SSS-I	#	22.6	6.1	21.8	18.5; 26.4	21.6	7.6	20.5	15.6; 26.3	-0.94	0.3530	-0.14	-0.42; 0.14

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzinterval.

Tab. X.9: Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs während der 2. Nachthälfte. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den Wi-Fi- und den Sham-Messnächten (Wi-Fi minus Sham). N = 34 Versuchspersonen. Signifikante Ergebnisse sind fett markiert.

		Sham				Wi-Fi							
Parameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
bezogen auf Schlaf-Wach-Zeiten													
TST	min	225.7	14.9	231.0	221.5; 233.5	228.0	8.0	230.5	226.0; 232.5	1.09	0.2848	0.19	-0.13; 0.51
WSPT	min	10.9	6.8	9.0	6.0; 13.5	11.1	6.5	9.5	7.5; 14.0	0.18	0.8555	0.04	-0.39; 0.47
SEI	min	94.0	6.2	96.1	92.3; 97.1	95.0	3.4	96.0	94.2; 96.9	1.15	0.2589	0.20	-0.11; 0.51
bezogen auf die Schlafarchitektur													
N1	min	22.0	9.8	20.0	16.0; 28.0	25.7	9.0	21.8	20.0; 31.0	2.17	**0.0370**	0.39	0.03; 0.76
N1P	%	9.8	4.4	9.3	7.4; 12.1	11.3	4.1	10.0	8.6; 13.5	2.00	0.0543	0.36	0.00; 0.72
N2	min	126.8	16.3	127.3	114.5; 139.5	126.3	18.9	127.5	110.5; 139.5	-0.14	0.8859	-0.03	-0.42; 0.37
N2P	%	56.4	7.5	56.0	51.1; 62.9	55.3	7.6	55.4	50.5; 60.5	-0.67	0.5074	-0.14	-0.54; 0.27
N3	min	7.8	9.7	3.0	0.0; 13.5	6.4	8.4	1.8	0.0; 10.5	-0.84	0.4097	-0.16	-0.52; 0.21
N3P	%	3.4	4.2	1.3	0.0; 5.9	2.8	3.7	0.8	0.0; 4.6	-0.81	0.4226	-0.15	-0.52; 0.22
R	min	69.1	19.9	66.8	58.0; 85.0	69.6	20.0	72.5	56.0; 83.5	0.16	0.8767	0.03	-0.31; 0.36
RP	%	30.4	7.9	29.3	25.9; 36.4	30.5	8.7	31.8	23.8; 36.8	0.09	0.9303	0.02	-0.32; 0.35
bezogen auf die Schlafkontinuität													
AWA-N	#	11.9	4.8	13.0	9.0; 15.0	12.9	4.1	13.0	10.0; 16.0	1.39	0.1736	0.23	-0.09; 0.55
AWA-I	#	3.2	1.4	3.4	2.3; 4.1	3.4	1.2	3.4	2.6; 4.2	1.13	0.2674	0.18	-0.13; 0.49
SSS-N	#	71.7	18.8	73.0	57.0; 83.0	74.9	18.4	74.0	64.0; 89.0	1.02	0.3170	0.17	-0.16; 0.50
SSS-I	#	19.2	5.5	19.1	15.1; 21.6	19.8	5.2	19.4	17.0; 23.3	0.68	0.5024	0.11	-0.21; 0.42

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzinterval.

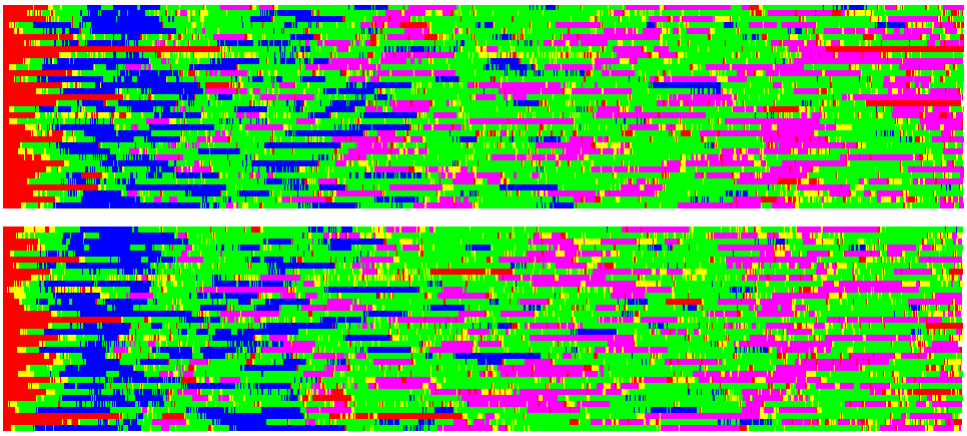


Abb. X.12: Darstellung der individuellen Hypnogramme in Form von Lasagne Plots. Oben: Sham, unten: WiFi. Farbkodierung: rot = wach, gelb = Schlafstadium N1, grün = Schlafstadium N2, Blau = Schlafstadium N3, pink = Schlafstadium R.

X.2.5 Mikrostrukturen des Schlafs

X.2.5.1 Arousal

In Tab. X.10 sind die deskriptiven Statistiken zu den Arousals im Schlaf zu finden. Ein Vergleich der Sham-Werte mit denen aus der TETRA-Studie ergab, dass nur die Anzahl der Arousal im REM-Schlaf in der vorliegenden Studie geringer war als in der TETRA-Studie (siehe Abb. X.13). Diese statistisch signifikante Variation könnte ebenfalls an der bereits erwähnten unterschiedlichen Auswertemethodik liegen.

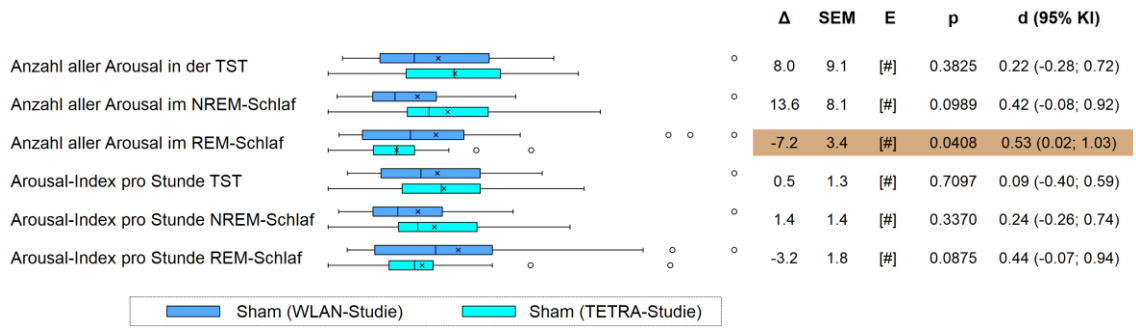


Abb. X.13: Vergleich der Ergebnisse zu den Arousal im Schlafs zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. Statistisch signifikante Ergebnisse sind braun unterlegt. Δ = Differenz „Daten der TETRA-Studie“ minus „vorliegende Daten“; SEM = Standardfehler; E = Einheit; p = Signifikanzwert; d = Cohen’s d [|d| < 0.2: kein Effekt, 0.2 ≤ |d| < 0.5: kleiner Effekt, 0.5 ≤ |d| < 0.8: mittlerer Effekt, |d| ≥ 0.8: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% KI = 95% Konfidenzintervall.

In Tab. X.10 sind neben den deskriptiven Statistiken auch noch die univariaten Testergebnisse für gepaarte Beobachtungen dargestellt. Es zeigte sich, dass weder die Anzahl der Arousal noch der Arousal-Index signifikante Unterschiede zwischen den Expositionen aufwies. Dies gilt bei Betrachtung der Arousal für die gesamte Nacht ebenso wie für eine differenzierte Betrachtung nach den Schlafstadien REM und NREM.

X.2.5.2 Power des Schlaf-EEGs in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln

Während die Arousal-Ergebnisse auf den Daten aller 34 Probanden basieren, wurde die Power im Frequenzbereich langsamer Oszillationen (0,50-1,00 Hz) sowie im Schlafspindelfrequenzbereich bzw. im Sigma-Frequenzband lediglich für die 30 Probanden ausgewertet, für die auch Daten zu den Gedächtnistests vorliegen (s.u.), da diese Ergebnisse im Kontext der Bedeutung des Schlafes für die schlafabhängige Gedächtniskonsolidierung relevant sind. Die American Academy of Sleep Medicine (Berry et al., 2018) unterscheidet zwei Sigma-Frequenzbänder. Das breitere Sigma-Frequenzband umfasst die Frequenzen von 10-16 Hz, das engere Sigma-Frequenzband die Frequenzen von 12-14 Hz. In Tab. X.11 sind die deskriptiven Statistiken für diese drei Frequenzbereiche aufgeschlüsselt nach Schlafstadium, Region und Exposition zusammengestellt. Ein Vergleich der vorliegenden Sham-Werte mit denen der Vorgängerstudie(n) ist für die hier behandelten Powerspektralwerte wegen unterschiedlicher Vorgehensweisen v.a. bei der Bereinigung von Artefakten in den Schlaf-EEG-Aufzeichnungen und bei den quantitativen Datenanalysen (Spektralberechnungen) mit keiner der Vorgängerstudien sinnvoll möglich. Deswegen wird an dieser Stelle auf diesen Vergleich verzichtet.

Eine ANOVA mit Messwiederholung mit den Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE und den Innersubjektfaktoren EXPOSITION und REGION sowie deren Interaktion zeigte, dass die Power im Frequenzbereich langsamer Oszillationen sowie in den beiden Sigma-Bändern sowohl im Schlafstadium N2 als auch im Schlafstadium N3 in Abhängigkeit von der Region variierte (siehe Tab. X.12). Die Power im Frequenzbereich langsamer Oszillationen war in beiden Schlafstadien frontopolar am größten und okzipital am geringsten. Für die beiden Sigma-Bänder war die Power an zentralen Lokalisationen am höchsten, gefolgt von den parietalen und den frontalen Lokalisationen. Am geringsten war die Power im Schlafspindelfrequenzbereich konsistent an den temporalen Lokalisationen (siehe Tab. X.11 und Abb. X.14a)

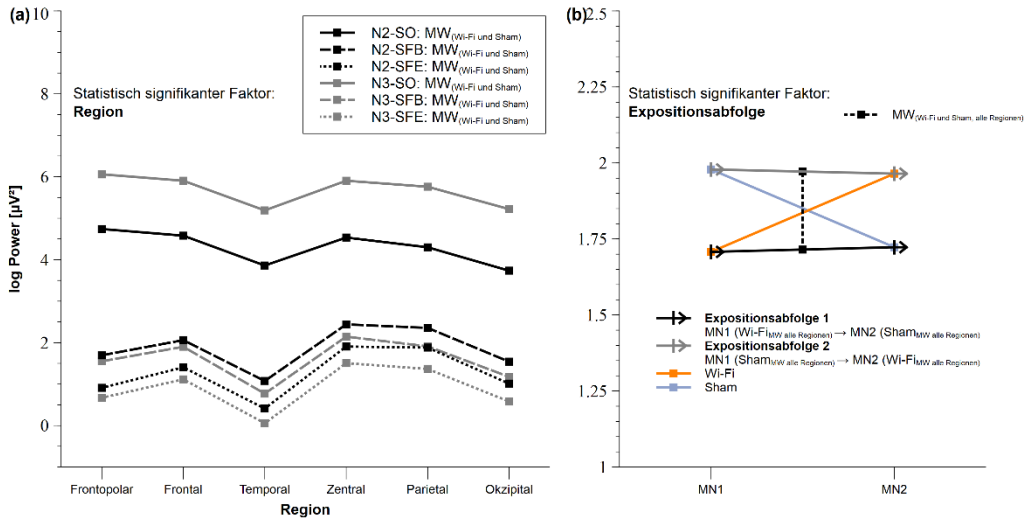


Abb. X.14: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts (a) des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln und (b) des Faktors EXPOSITIONSABFOLGE für die Powerspektralwerte im breiten Schlafspindelfrequenzbereich im Schlafstadium N2.

Die Power im breiten Schlafspindelfrequenzbereich im Schlafstadium N2 variierte außerdem noch statistisch signifikant mit der Expositionsabfolge (siehe Abb. X.14b). Die 13 Probanden, die in der ersten Messnacht die WiFi-Exposition und in der zweiten Messnacht die Sham-Exposition zu absolvieren hatten, wiesen eine geringere über beide Nächte und alle Regionen gemittelte EEG-Power (MW±SD: 1.72 ± 0.58 µV²) als jene 17 Probanden auf, bei denen die Expositionsbedingungen in der entgegengesetzten Richtung durchgeführt wurden (MW±SD: 1.97 ± 0.63 µV²).

Tab. X.10: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf Arousalparameter. Die Ergebnisse basieren auf paarweisen Analysen der individuellen Unterschiede zwischen den Wi-Fi- und den Sham-Messnächten (Wi-Fi minus Sham). N = 34 Versuchspersonen.

		Sham				Wi-Fi							
Arousalparameter	Einheit	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75	t(33)	p	d_{av}	95% KI
AR-N	#	90.7	38.4	79.0	62.0; 117.0	94.3	39.1	85.5	64.0; 116.0	0.89	0.3773	0.09	-0.11; 0.30
ARNR-N	#	71.1	33.2	61.0	51.0; 80.0	75.0	31.8	67.0	53.0; 96.0	1.02	0.3169	0.12	-0.12; 0.36
ARR-N	#	19.6	18.1	15.0	6.0; 25.0	19.3	16.5	14.0	7.0; 24.0	-0.30	0.7634	-0.02	-0.16; 0.12
AR-I	#	12.5	5.4	11.4	8.5; 15.7	12.9	5.4	11.4	9.0; 16.0	0.75	0.4575	0.07	-0.12; 0.26
ARNR-I	#	12.6	6.0	11.0	8.7; 14.7	13.0	5.6	11.9	8.9; 16.2	0.64	0.5253	0.07	-0.14; 0.28
ARR-I	#	11.6	8.8	9.6	4.0; 14.7	12.0	8.4	9.7	5.9; 15.7	0.57	0.5715	0.05	-0.12; 0.22

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil; t = t-Statistik, Freiheitsgrade sind im Klammerausdruck angegeben; p = Signifikanzwert; d = Cohen's d_{av} [$|d_{av}| < 0.2$: kein Effekt, $0.2 \leq |d_{av}| < 0.5$: kleiner Effekt, $0.5 \leq |d_{av}| < 0.8$: mittlerer Effekt, $|d_{av}| \geq 0.8$: großer Effekt (Cohen, 1988)]; 95% CI = 95% Konfidenzinterval.

Tab. X.11: Deskriptive Statistiken für den Frequenzbereich langsamer Oszillationen sowie für die beiden Schlafspindelfrequenzbereiche aufgeschlüsselt nach Schlafstadium, Region und Exposition (Wi-Fi und Sham). N = 30 Versuchspersonen.

				Sham				Wi-Fi			
Schlafstadium	Frequenzband	Einheit	Region	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75
N2	SO (0.5-1 Hz)	μV^2	Frontopolar	4.74	0.27	4.75	4.53; 4.95	4.74	0.30	4.78	4.51; 4.92
		μV^2	Frontal	4.60	0.25	4.57	4.45; 4.79	4.56	0.24	4.59	4.43; 4.74
		μV^2	Temporal	3.91	0.50	3.86	3.51; 4.28	3.81	0.64	3.56	3.34; 4.17
		μV^2	Central	4.55	0.23	4.53	4.42; 4.71	4.52	0.25	4.50	4.36; 4.64
		μV^2	Parietal	4.31	0.26	4.29	4.15; 4.50	4.29	0.27	4.23	4.07; 4.50
		μV^2	Occipital	3.79	0.40	3.74	3.50; 4.00	3.68	0.46	3.54	3.37; 3.99
	Sigma-B (breit; 11-16 Hz)	μV^2	Frontopolar	1.69	0.39	1.60	1.38; 2.02	1.70	0.39	1.55	1.42; 2.10
		μV^2	Frontal	2.06	0.38	1.97	1.82; 2.40	2.06	0.38	2.06	1.77; 2.45
		μV^2	Temporal	1.07	0.41	0.99	0.68; 1.37	1.08	0.35	1.03	0.84; 1.31
		μV^2	Central	2.44	0.37	2.41	2.21; 2.81	2.44	0.37	2.42	2.17; 2.73
		μV^2	Parietal	2.36	0.40	2.30	2.08; 2.67	2.35	0.39	2.34	2.05; 2.68
		μV^2	Occipital	1.58	0.48	1.49	1.30; 1.98	1.50	0.54	1.52	1.04; 1.94
	Sigma-E (eng; 12-14 Hz)	μV^2	Frontopolar	0.90	0.40	0.87	0.60; 1.38	0.92	0.40	0.79	0.64; 1.32
		μV^2	Frontal	1.40	0.39	1.36	1.08; 1.77	1.41	0.39	1.36	1.21; 1.73

				Sham				Wi-Fi			
Schlafstadium	Frequenzband	Einheit	Region	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75
		µV²	Temporal	0.40	0.41	0.43	0.01; 0.66	0.42	0.36	0.46	0.11; 0.61
		µV²	Central	1.90	0.41	1.92	1.62; 2.17	1.91	0.41	1.90	1.59; 2.21
		µV²	Parietal	1.88	0.44	1.85	1.64; 2.14	1.88	0.42	1.82	1.59; 2.23
		µV²	Occipital	1.05	0.54	1.00	0.72; 1.42	0.97	0.59	0.98	0.52; 1.42
N3	SO (0.5-1 Hz)	µV²	Frontopolar	6.06	0.33	6.04	5.91; 6.19	6.06	0.31	6.06	5.92; 6.34
		µV²	Frontal	5.92	0.32	5.90	5.74; 6.08	5.89	0.29	5.93	5.71; 6.08
		µV²	Temporal	5.21	0.45	5.20	4.93; 5.41	5.17	0.43	5.16	4.85; 5.43
		µV²	Central	5.91	0.33	5.87	5.71; 6.13	5.90	0.29	5.88	5.65; 6.12
		µV²	Parietal	5.78	0.38	5.77	5.58; 5.95	5.74	0.36	5.72	5.47; 6.02
		µV²	Occipital	5.27	0.59	5.22	4.95; 5.71	5.17	0.52	5.12	4.91; 5.43
	Sigma-B (breit; 11-16 Hz)	µV²	Frontopolar	1.56	0.50	1.48	1.15; 1.95	1.54	0.47	1.46	1.21; 1.95
		µV²	Frontal	1.92	0.50	1.81	1.57; 2.36	1.88	0.49	1.79	1.60; 2.27
		µV²	Temporal	0.78	0.38	0.77	0.49; 1.05	0.76	0.35	0.79	0.47; 1.09
		µV²	Central	2.15	0.45	2.04	1.83; 2.43	2.14	0.44	2.12	1.84; 2.42
		µV²	Parietal	1.92	0.41	1.89	1.63; 2.13	1.90	0.41	1.97	1.56; 2.26
		µV²	Occipital	1.22	0.45	1.18	0.91; 1.59	1.13	0.51	1.11	0.65; 1.53
	Sigma-E (eng; 12-14 Hz)	µV²	Frontopolar	0.69	0.46	0.65	0.43; 0.96	0.65	0.43	0.64	0.33; 1.05
		µV²	Frontal	1.13	0.46	1.02	0.87; 1.58	1.10	0.45	1.05	0.78; 1.49
		µV²	Temporal	0.06	0.36	0.03	-0.19; 0.33	0.05	0.35	0.09	-0.24; 0.32
		µV²	Central	1.51	0.46	1.46	1.21; 1.82	1.50	0.45	1.50	1.14; 1.84
		µV²	Parietal	1.37	0.46	1.33	1.11; 1.66	1.36	0.45	1.36	0.98; 1.66
		µV²	Occipital	0.62	0.51	0.59	0.31; 0.95	0.54	0.56	0.59	-0.01; 0.98

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil

Tab. X.12: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den Powerspektralwerten in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. N = 30 Versuchspersonen.

	SO - Stadium N2				SO - Stadium N3			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.17	0.6821	0.006	0.009	0.71	0.4067	0.025	0.022
Exposition	1.50	0.2312	0.051	0.005	1.41	0.2445	0.048	0.003
	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G
Region	76.05	**<.0001**	0.731	0.497	75.37	**<.0001**	0.729	0.432
Exposition*Region	1.00	0.3802	0.034	0.004	1.31	0.2782	0.045	0.003

	Sigma-B - Stadium N2				Sigma-B - Stadium N3			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	4.32	**0.0470**	0.134	0.046	0.93	0.3424	0.032	0.008
Exposition	0.87	0.3580	0.030	0.001	1.75	0.1967	0.059	0.002
	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G
Region	196.11	**<.0001**	0.875	0.537	170.84	**<.0001**	0.859	0.501
Exposition*Region	1.28	0.2876	0.044	0.001	0.93	0.4134	0.032	0.001

	Sigma-E - Stadium N2				Sigma-E - Stadium N3			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	3.31	0.0797	0.106	0.028	0.61	0.4418	0.021	0.002
Exposition	0.11	0.7475	0.004	0.000	0.89	0.3547	0.031	0.001
	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G	$F_{(5,140)}$	pGG	η^2_p	η^2_G
Region	165.72	**<.0001**	0.855	0.574	148.03	**<.0001**	0.841	0.524
Exposition*Region	1.29	0.2825	0.044	0.001	0.84	0.4528	0.029	0.001

SO = slow oscillations (0,50 – 1,00 Hz); Sigma-B = breites Sigma-Frequenzband (11,00 – 16,00 Hz; Sigma-E = enges Frequenzband (12,00 – 14,00 Hz); F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; pGG = Signifikanzwert (Greenhouse-Geisser korrigiert); η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

X.2.5.3 Power des Schlaf-EEGs in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen

Die Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs zusammengefasst zu Frequenzbändern nach den IPEG-Empfehlungen (Jobert et al., 2013) basieren auf den Daten aller 34 untersuchten Probanden. In Tab. X.13 sind die deskriptiven Statistiken der nach Schlafstadien getrennt ermittelten Powerspektralwerte für sechs Hirnregionen unter beiden Expositionsbedingungen zusammengestellt. Da auch für die Powerspektralwerte dieser Frequenzbereiche gilt, dass die angewandte Methodik bezüglich Datenerhebung und Datenweiterverarbeitung zwischen den Studien nicht identisch war, ist ein Vergleich der Sham-Werte auch an dieser Stelle nicht sinnvoll möglich.

Wie Tab. X.14 zu entnehmen ist, zeigt lediglich das Alpha-Frequenzband im NREM-Schlaf einen signifikanten Expositionseffekt. Die globale EEG Power im Alpha-Band ist unter Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham vermindert (Tab. X.13; Abb. X.17b). Alle anderen statistisch signifikanten Effekte beziehen sich auf den Faktor REGION: Für alle Frequenzbänder unterscheiden sich die EEG-Powerspektralwerte zwischen den Hirnregionen (siehe Tab. X.13 und Abb. X.15, X.16 sowie Abb. X.17a). Von den Interaktionseffekten war wiederum keiner signifikant.

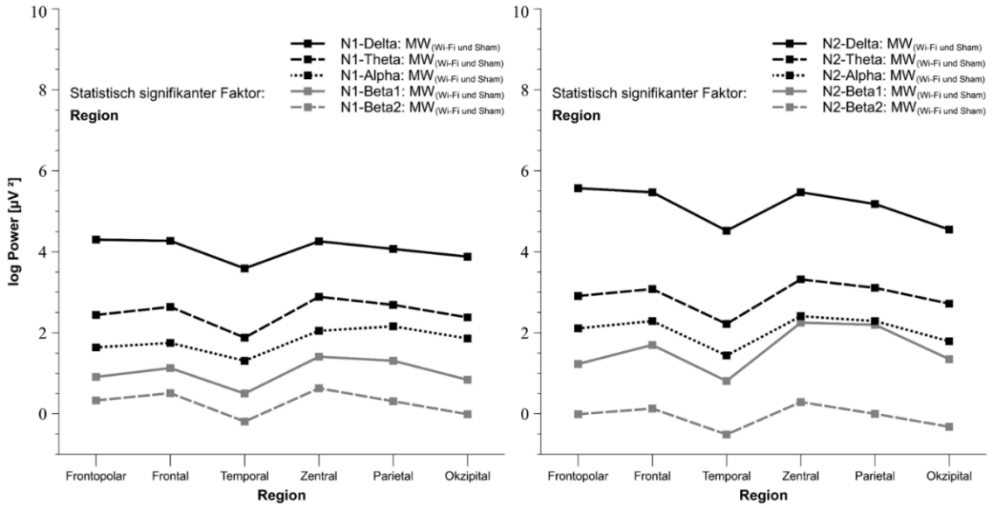


Abb. X.15: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für das Schlafstadium N1 (links) und das Schlafstadium N2 (rechts).

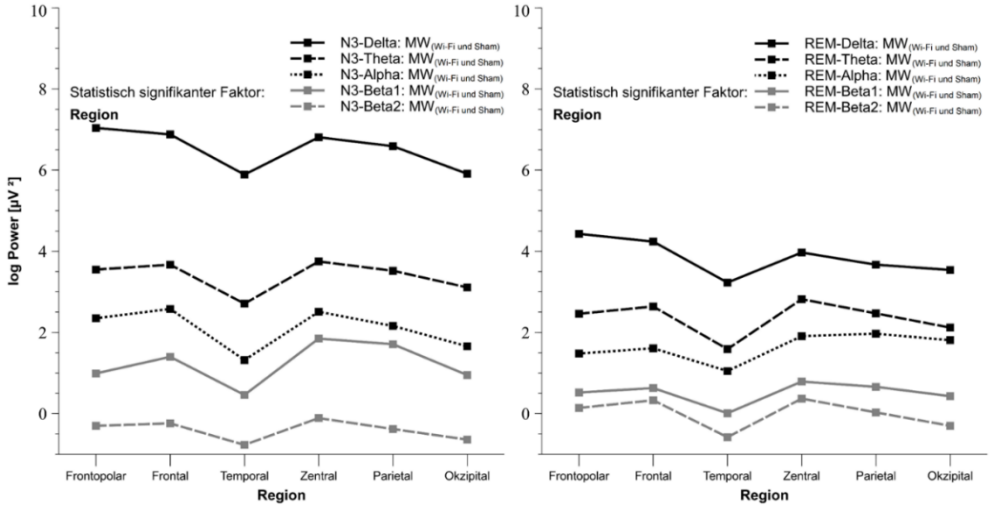


Abb. X.16: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für das Schlafstadium N3 (links) und das Schlafstadium REM (rechts).

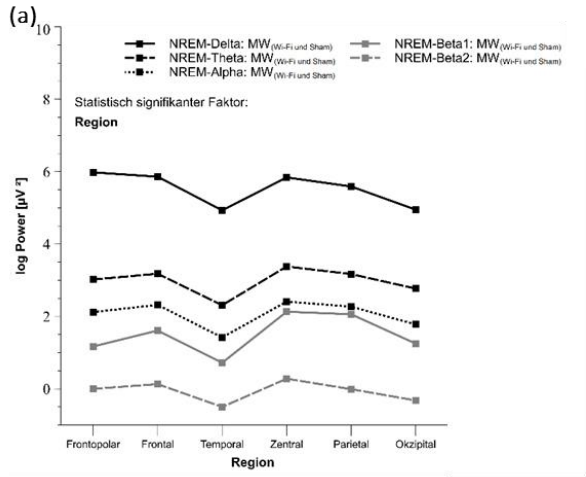


Abb. X.17a: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für den gesamten NREM-Schlaf.

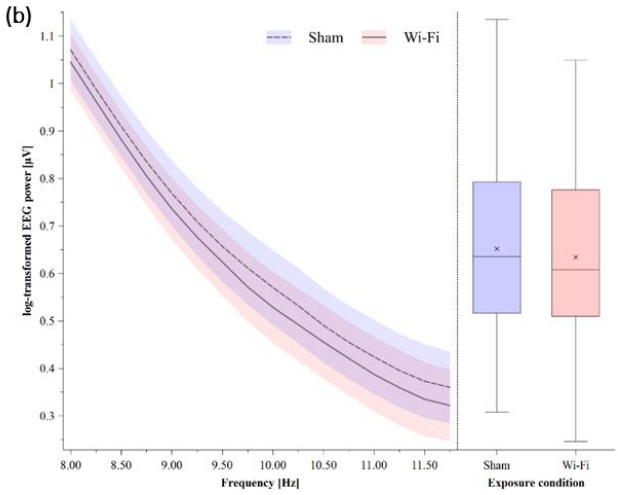


Abb. X.17b: Globale EEG-Leistung (log-transformiert) im Alpha-Frequenzbereich während des NREM-Schlafs unter beiden Expositionsbedingungen. Die linke Seite der Abbildung zeigt die EEG-Power innerhalb des Alpha-Frequenzbereichs (8,00 - 11,75 Hz) für einzelne Spektrallinien mit einer Auflösung von 0.25 Hz. Als Streuungsmaß wurde der Standardfehler verwendet. Auf der rechten Seite wird die EEG-Power im Frequenzband als Box-Plots dargestellt. Die Whisker definieren dabei den 1,5-fachen Bereich des Interquartilsabstandes.

.

Tab. X.13: Deskriptive Statistiken für den Delta-, Theta-, Alpha-, Beta1- und Beta2-Frequenzbereich aufgeschlüsselt nach Schlafstadium, Region und Exposition (Wi-Fi und Sham). N = 34 Versuchspersonen.

				Sham				Wi-Fi			
Schlafstadium	Frequenzband	Einheit	Region	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75
N1	Delta (0.50-3.75 Hz)	µV²	Frontopolar	4.32	0.25	4.37	4.12; 4.47	4.27	0.26	4.30	4.09; 4.42
		µV²	Frontal	4.28	0.24	4.27	4.10; 4.40	4.25	0.26	4.26	4.11; 4.43
		µV²	Temporal	3.63	0.33	3.59	3.38; 3.88	3.54	0.38	3.50	3.28; 3.74
		µV²	Central	4.27	0.26	4.26	4.10; 4.45	4.24	0.27	4.22	4.08; 4.45
		µV²	Parietal	4.09	0.30	4.08	3.92; 4.28	4.05	0.31	4.04	3.88; 4.26
		µV²	Okzipital	3.91	0.44	3.85	3.69; 4.13	3.84	0.46	3.82	3.55; 4.13
	Theta (4.00-7.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.45	0.26	2.43	2.26; 2.54	2.43	0.23	2.43	2.22; 2.59
		µV²	Frontal	2.65	0.25	2.62	2.46; 2.82	2.63	0.23	2.60	2.49; 2.79
		µV²	Temporal	1.89	0.33	1.85	1.63; 2.10	1.86	0.28	1.86	1.67; 1.99
		µV²	Central	2.88	0.29	2.83	2.64; 3.09	2.89	0.27	2.81	2.74; 3.06
		µV²	Parietal	2.70	0.35	2.66	2.54; 2.94	2.68	0.32	2.63	2.54; 2.78
		µV²	Okzipital	2.41	0.44	2.38	2.13; 2.69	2.35	0.40	2.35	2.04; 2.65
	Alpha (8.00-11.75 Hz)	µV²	Frontopolar	1.66	0.32	1.61	1.49; 1.87	1.62	0.33	1.63	1.34; 1.79
		µV²	Frontal	1.77	0.33	1.68	1.57; 1.88	1.73	0.31	1.71	1.56; 1.87
		µV²	Temporal	1.32	0.44	1.21	1.03; 1.54	1.29	0.38	1.21	1.06; 1.51
		µV²	Central	2.07	0.36	1.97	1.79; 2.41	2.03	0.35	1.97	1.78; 2.28
		µV²	Parietal	2.18	0.41	2.06	1.90; 2.51	2.13	0.40	2.04	1.87; 2.45
		µV²	Okzipital l	1.89	0.45	1.86	1.66; 2.08	1.82	0.50	1.78	1.48; 2.11
	Beta1 (12.00-15.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.92	0.38	0.84	0.62; 1.24	0.89	0.38	0.85	0.55; 1.21
		µV²	Frontal	1.15	0.41	1.07	0.86; 1.48	1.11	0.40	1.09	0.74; 1.45
		µV²	Temporal	0.51	0.48	0.39	0.12; 0.92	0.48	0.43	0.37	0.11; 0.79
		µV²	Central	1.42	0.45	1.36	1.04; 1.75	1.39	0.43	1.41	1.06; 1.73
		µV²	Parietal	1.32	0.50	1.23	1.03; 1.71	1.29	0.48	1.21	1.00; 1.57
		µV²	Okzipital	0.87	0.49	0.81	0.49; 1.26	0.81	0.56	0.75	0.35; 1.22
	Beta2 (16.00-19.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.33	0.36	0.30	0.02; 0.51	0.33	0.39	0.18	0.04; 0.59
		µV²	Frontal	0.52	0.41	0.44	0.20; 0.76	0.50	0.43	0.34	0.21; 0.84
		µV²	Temporal	-0.19	0.37	-0.20	-0.54; 0.12	-0.19	0.39	-0.28	-0.46; 0.11
		µV²	Central	0.64	0.46	0.51	0.28; 0.87	0.62	0.47	0.53	0.23; 0.90
		µV²	Parietal	0.32	0.44	0.26	0.01; 0.57	0.30	0.46	0.16	-0.02; 0.53
		µV²	Okzipital	0.00	0.37	0.00	-0.29; 0.29	-0.02	0.46	-0.17	-0.39; 0.30
N2	Delta (0.50-3.75 Hz)	µV²	Frontopolar	5.57	0.23	5.56	5.40; 5.77	5.56	0.26	5.57	5.37; 5.74
		µV²	Frontal	5.49	0.21	5.49	5.35; 5.61	5.45	0.22	5.46	5.36; 5.53
		µV²	Temporal	4.55	0.37	4.54	4.24; 4.80	4.48	0.46	4.31	4.14; 4.74

		µV²	Central	5.48	0.24	5.50	5.31; 5.64	5.46	0.24	5.45	5.29; 5.56
		µV²	Parietal	5.19	0.28	5.17	5.05; 5.34	5.16	0.29	5.13	4.95; 5.35
		µV²	Okzipital	4.59	0.40	4.59	4.26; 4.81	4.51	0.46	4.44	4.24; 4.81
	Theta (4.00-7.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.91	0.23	2.90	2.75; 3.11	2.90	0.23	2.89	2.70; 3.09
		µV²	Frontal	3.09	0.24	3.08	2.98; 3.30	3.07	0.22	3.05	2.92; 3.26
		µV²	Temporal	2.23	0.30	2.20	2.03; 2.46	2.21	0.26	2.15	2.03; 2.41
		µV²	Central	3.32	0.29	3.26	3.15; 3.52	3.31	0.27	3.23	3.11; 3.52
		µV²	Parietal	3.12	0.33	3.08	2.94; 3.35	3.09	0.31	3.03	2.93; 3.21
		µV²	Okzipital	2.74	0.38	2.73	2.54; 3.00	2.69	0.39	2.65	2.42; 3.05
	Alpha (8.00-11.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.11	0.40	2.06	1.80; 2.35	2.10	0.40	2.09	1.85; 2.40
		µV²	Frontal	2.30	0.41	2.25	2.05; 2.53	2.28	0.38	2.28	1.99; 2.49
		µV²	Temporal	1.45	0.46	1.36	1.10; 1.75	1.43	0.39	1.39	1.12; 1.69
		µV²	Central	2.42	0.40	2.34	2.12; 2.68	2.39	0.37	2.36	2.16; 2.69
		µV²	Parietal	2.30	0.43	2.24	1.98; 2.62	2.27	0.40	2.20	2.01; 2.60
		µV²	Okzipital	1.82	0.45	1.81	1.49; 2.05	1.75	0.47	1.74	1.37; 2.06
	Beta1 (12.00-15.75 Hz)	µV²	Frontopolar	1.23	0.39	1.13	0.87; 1.65	1.22	0.41	1.14	0.94; 1.69
		µV²	Frontal	1.70	0.39	1.59	1.38; 2.11	1.69	0.40	1.59	1.44; 2.12
		µV²	Temporal	0.81	0.45	0.75	0.41; 1.13	0.80	0.43	0.78	0.41; 1.07
		µV²	Central	2.24	0.41	2.16	1.97; 2.56	2.25	0.41	2.19	1.96; 2.52
		µV²	Parietal	2.21	0.46	2.09	1.91; 2.67	2.19	0.47	2.12	1.88; 2.51
		µV²	Okzipital	1.38	0.54	1.30	1.00; 1.89	1.31	0.60	1.31	0.82; 1.78
	Beta2 (16.00-19.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.00	0.35	-0.08	-0.27; 0.22	-0.01	0.35	-0.09	-0.28; 0.27
		µV²	Frontal	0.14	0.38	0.06	-0.12; 0.38	0.12	0.37	0.05	-0.17; 0.36
		µV²	Temporal	-0.49	0.39	-0.60	-0.81; -0.15	-0.52	0.37	-0.64	-0.77; -0.20
		µV²	Central	0.29	0.41	0.19	-0.01; 0.59	0.28	0.40	0.19	-0.05; 0.52
		µV²	Parietal	0.02	0.40	-0.03	-0.27; 0.26	-0.02	0.40	-0.06	-0.37; 0.21
		µV²	Okzipital	-0.30	0.35	-0.37	-0.61; 0.05	-0.34	0.41	-0.39	-0.67; 0.03
N3	Delta (0.50-3.75 Hz)	µV²	Frontopolar	7.03	0.35	7.04	6.80; 7.34	7.04	0.34	7.06	6.83; 7.37
		µV²	Frontal	6.88	0.33	6.87	6.65; 7.14	6.87	0.32	6.88	6.67; 7.14
		µV²	Temporal	5.92	0.40	5.90	5.64; 6.22	5.85	0.39	5.92	5.51; 6.11
		µV²	Central	6.81	0.32	6.81	6.59; 7.05	6.80	0.29	6.85	6.52; 7.06
		µV²	Parietal	6.60	0.39	6.58	6.34; 6.91	6.57	0.38	6.65	6.22; 6.88
		µV²	Okzipital	5.95	0.57	5.90	5.63; 6.26	5.86	0.51	5.86	5.57; 6.11
	Theta (4.00-7.75 Hz)	µV²	Frontopolar	3.56	0.26	3.55	3.40; 3.75	3.54	0.26	3.49	3.35; 3.72
		µV²	Frontal	3.68	0.26	3.67	3.50; 3.82	3.66	0.26	3.63	3.46; 3.84
		µV²	Temporal	2.71	0.31	2.72	2.47; 2.96	2.70	0.27	2.58	2.48; 2.96
		µV²	Central	3.76	0.28	3.72	3.57; 3.88	3.74	0.27	3.75	3.47; 3.94
		µV²	Parietal	3.53	0.30	3.51	3.34; 3.73	3.51	0.30	3.53	3.29; 3.65
		µV²	Okzipital	3.14	0.42	3.17	2.81; 3.35	3.08	0.42	3.03	2.75; 3.43
	Alpha (8.00-11.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.36	0.55	2.20	2.00; 2.79	2.33	0.55	2.17	2.02; 2.78

		µV²	Frontal	2.59	0.56	2.48	2.20; 2.91	2.56	0.55	2.40	2.17; 2.95
		µV²	Temporal	1.34	0.45	1.31	1.03; 1.61	1.30	0.42	1.22	0.93; 1.53
		µV²	Central	2.53	0.51	2.43	2.15; 2.88	2.49	0.50	2.47	2.13; 2.83
		µV²	Parietal	2.17	0.46	2.12	1.87; 2.45	2.14	0.46	2.01	1.83; 2.45
		µV²	Okzipital	1.70	0.44	1.69	1.32; 2.02	1.61	0.48	1.66	1.28; 1.91
	Beta1 (12.00-15.75 Hz)	µV²	Frontopolar	1.01	0.42	1.01	0.71; 1.32	0.96	0.41	0.94	0.67; 1.37
		µV²	Frontal	1.42	0.43	1.30	1.17; 1.79	1.38	0.44	1.32	1.09; 1.76
		µV²	Temporal	0.48	0.40	0.45	0.18; 0.77	0.44	0.41	0.46	0.11; 0.72
		µV²	Central	1.85	0.45	1.72	1.52; 2.21	1.84	0.45	1.85	1.50; 2.15
		µV²	Parietal	1.72	0.47	1.68	1.40; 1.91	1.69	0.48	1.74	1.36; 2.01
		µV²	Okzipital	0.99	0.49	0.94	0.67; 1.36	0.90	0.56	0.87	0.39; 1.41
	Beta2 (16.00-19.75 Hz)	µV²	Frontopolar	-0.28	0.38	-0.31	-0.54; 0.02	-0.31	0.36	-0.33	-0.58; -0.05
		µV²	Frontal	-0.22	0.37	-0.33	-0.42; 0.03	-0.25	0.35	-0.32	-0.51; -0.01
		µV²	Temporal	-0.75	0.44	-0.89	-1.08; -0.46	-0.79	0.44	-0.86	-1.11; -0.54
		µV²	Central	-0.10	0.37	-0.09	-0.39; 0.13	-0.12	0.39	-0.18	-0.40; 0.12
		µV²	Parietal	-0.36	0.36	-0.38	-0.62; -0.11	-0.40	0.38	-0.39	-0.74; -0.19
		µV²	Okzipital	-0.60	0.33	-0.64	-0.85; -0.33	-0.68	0.44	-0.68	-1.00; -0.32
NREM	Delta (0.50-3.75 Hz)	µV²	Frontopolar	5.98	0.35	5.98	5.75; 6.27	5.98	0.37	5.98	5.68; 6.27
		µV²	Frontal	5.87	0.33	5.87	5.59; 6.18	5.84	0.34	5.89	5.58; 6.12
		µV²	Temporal	4.96	0.43	4.92	4.56; 5.29	4.89	0.45	4.89	4.54; 5.16
		µV²	Central	5.84	0.35	5.78	5.61; 6.13	5.83	0.35	5.88	5.56; 6.11
		µV²	Parietal	5.60	0.42	5.51	5.29; 5.96	5.57	0.42	5.62	5.19; 5.92
		µV²	Okzipital	5.00	0.56	5.01	4.65; 5.32	4.90	0.52	4.87	4.65; 5.19
	Theta (4.00-7.75 Hz)	µV²	Frontopolar	3.03	0.24	3.04	2.83; 3.25	3.01	0.24	2.95	2.84; 3.21
		µV²	Frontal	3.19	0.25	3.18	3.04; 3.41	3.17	0.23	3.14	2.98; 3.32
		µV²	Temporal	2.31	0.31	2.33	2.07; 2.61	2.30	0.27	2.26	2.08; 2.53
		µV²	Central	3.38	0.29	3.36	3.14; 3.57	3.38	0.28	3.37	3.18; 3.52
		µV²	Parietal	3.18	0.33	3.13	2.94; 3.39	3.15	0.32	3.09	2.99; 3.31
		µV²	Okzipital	2.80	0.41	2.81	2.52; 3.06	2.74	0.40	2.70	2.41; 3.07
	Alpha (8.00-11.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.13	0.42	2.05	1.79; 2.46	2.11	0.43	2.04	1.84; 2.41
		µV²	Frontal	2.33	0.43	2.32	2.05; 2.59	2.30	0.41	2.30	2.01; 2.50
		µV²	Temporal	1.43	0.45	1.34	1.08; 1.81	1.40	0.39	1.37	1.10; 1.71
		µV²	Central	2.42	0.41	2.33	2.18; 2.74	2.39	0.38	2.34	2.16; 2.69
		µV²	Parietal	2.28	0.42	2.22	2.00; 2.63	2.25	0.40	2.16	1.99; 2.64
		µV²	Okzipital	1.81	0.43	1.82	1.52; 2.04	1.74	0.47	1.72	1.35; 2.06
	Beta1 (12.00-15.75 Hz)	µV²	Frontopolar	1.17	0.38	1.12	0.84; 1.55	1.16	0.39	1.10	0.86; 1.56
		µV²	Frontal	1.62	0.39	1.54	1.34; 1.98	1.60	0.39	1.51	1.32; 2.02
		µV²	Temporal	0.73	0.44	0.66	0.37; 1.08	0.71	0.41	0.70	0.36; 1.00
		µV²	Central	2.13	0.42	2.07	1.85; 2.45	2.12	0.41	2.09	1.78; 2.38
		µV²	Parietal	2.07	0.45	1.97	1.80; 2.51	2.05	0.46	2.02	1.77; 2.37

		µV²	Okzipital	1.28	0.51	1.21	0.91; 1.76	1.21	0.58	1.21	0.68; 1.66
	Beta2 (16.00-19.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.00	0.35	-0.07	-0.28; 0.24	0.00	0.35	-0.11	-0.27; 0.26
		µV²	Frontal	0.14	0.37	0.05	-0.13; 0.38	0.12	0.36	0.03	-0.19; 0.42
		µV²	Temporal	-0.49	0.38	-0.57	-0.82; -0.15	-0.50	0.36	-0.64	-0.74; -0.19
		µV²	Central	0.28	0.39	0.19	-0.01; 0.52	0.28	0.39	0.19	-0.01; 0.53
		µV²	Parietal	0.01	0.38	-0.07	-0.31; 0.23	-0.02	0.39	-0.10	-0.35; 0.19
		µV²	Okzipital	-0.30	0.33	-0.35	-0.60; -0.01	-0.33	0.40	-0.35	-0.65; -0.01
REM	Delta (0.50-3.75 Hz)	µV²	Frontopolar	4.43	0.27	4.44	4.20; 4.58	4.43	0.27	4.47	4.19; 4.63
		µV²	Frontal	4.24	0.26	4.29	4.06; 4.41	4.23	0.25	4.24	4.11; 4.41
		µV²	Temporal	3.25	0.25	3.26	3.05; 3.42	3.21	0.36	3.17	2.95; 3.47
		µV²	Central	3.97	0.27	3.93	3.79; 4.10	3.96	0.24	3.97	3.81; 4.10
		µV²	Parietal	3.67	0.30	3.61	3.48; 3.90	3.66	0.29	3.62	3.48; 3.89
		µV²	Okzipital	3.57	0.46	3.54	3.29; 3.75	3.50	0.48	3.49	3.18; 3.70
	Theta (4.00-7.75 Hz)	µV²	Frontopolar	2.46	0.25	2.47	2.30; 2.63	2.45	0.23	2.47	2.32; 2.61
		µV²	Frontal	2.65	0.24	2.69	2.45; 2.77	2.63	0.23	2.62	2.54; 2.80
		µV²	Temporal	1.59	0.28	1.61	1.41; 1.77	1.59	0.27	1.58	1.41; 1.76
		µV²	Central	2.82	0.27	2.79	2.67; 2.96	2.82	0.25	2.77	2.66; 2.97
		µV²	Parietal	2.48	0.30	2.45	2.25; 2.70	2.46	0.27	2.44	2.27; 2.63
		µV²	Okzipital	2.15	0.42	2.15	1.97; 2.39	2.09	0.42	2.07	1.83; 2.37
	Alpha (8.00-11.75 Hz)	µV²	Frontopolar	1.48	0.29	1.46	1.29; 1.73	1.47	0.30	1.45	1.30; 1.72
		µV²	Frontal	1.62	0.27	1.60	1.44; 1.86	1.60	0.28	1.61	1.44; 1.81
		µV²	Temporal	1.04	0.41	1.04	0.69; 1.37	1.05	0.41	1.03	0.75; 1.31
		µV²	Central	1.91	0.31	1.94	1.63; 2.15	1.90	0.33	1.94	1.66; 2.11
		µV²	Parietal	1.98	0.40	1.92	1.71; 2.29	1.95	0.42	1.94	1.66; 2.24
		µV²	Okzipital	1.84	0.50	1.79	1.64; 2.12	1.77	0.57	1.64	1.47; 2.18
	Beta1 (12.00-15.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.52	0.34	0.47	0.31; 0.84	0.51	0.34	0.50	0.26; 0.78
		µV²	Frontal	0.64	0.36	0.57	0.36; 0.92	0.62	0.35	0.62	0.37; 0.80
		µV²	Temporal	0.01	0.49	0.02	-0.37; 0.39	0.01	0.45	0.01	-0.24; 0.23
		µV²	Central	0.79	0.39	0.76	0.53; 1.00	0.79	0.40	0.74	0.54; 1.00
		µV²	Parietal	0.66	0.47	0.65	0.32; 0.95	0.66	0.46	0.62	0.35; 0.96
		µV²	Okzipital	0.45	0.50	0.40	0.07; 0.74	0.41	0.59	0.35	-0.04; 0.84
	Beta2 (16.00-19.75 Hz)	µV²	Frontopolar	0.15	0.42	0.03	-0.10; 0.46	0.13	0.43	0.00	-0.13; 0.46
		µV²	Frontal	0.34	0.48	0.22	0.03; 0.64	0.32	0.47	0.22	0.02; 0.56
		µV²	Temporal	-0.57	0.46	-0.59	-0.85; -0.21	-0.58	0.44	-0.61	-0.84; -0.31
		µV²	Central	0.38	0.50	0.28	0.01; 0.63	0.36	0.48	0.31	0.07; 0.60
		µV²	Parietal	0.04	0.51	-0.01	-0.28; 0.32	0.02	0.50	-0.04	-0.24; 0.31
		µV²	Okzipital	-0.27	0.46	-0.31	-0.65; 0.13	-0.33	0.55	-0.31	-0.75; 0.07

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil

Tab. X.14: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den Powerspektralwerten für den Delta-, Theta-, Alpha-, Beta1- und Beta2-Frequenzbereich . Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 34 Versuchspersonen.

	Exposition (1, 33)				Region (5, 165)				Exposition * Region (5, 165)			
Parameter	F	p	η^2_p	η^2_G	F	pGG	η^2_p	η^2_G	F	pGG	η^2_p	η^2_G
Schlafstadium N1												
Delta	3.83	0.0588	0.104	0.007	112.17	**< 0.0001**	0.773	0.399	0.94	0.4173	0.028	0.001
Theta	1.35	0.2535	0.039	0.002	153.22	**< 0.0001**	0.823	0.519	1.07	0.3637	0.031	0.001
Alpha	2.83	0.1020	0.079	0.004	96.55	**< 0.0001**	0.745	0.350	0.32	0.7690	0.010	< 0.001
Beta1	2.44	0.1278	0.069	0.002	147.83	**< 0.0001**	0.818	0.322	0.23	0.8524	0.007	< 0.001
Beta2	0.52	0.4750	0.016	< 0.001	184.79	**< 0.0001**	0.848	0.318	0.46	0.7091	0.014	< 0.001
Schlafstadium N2												
Delta	2.93	0.0962	0.082	0.005	198.41	**< 0.0001**	0.857	0.662	0.97	0.3927	0.029	0.002
Theta	1.99	0.1672	0.057	0.001	212.53	**< 0.0001**	0.866	0.602	0.55	0.6224	0.016	0.001
Alpha	3.93	0.0558	0.106	0.001	148.61	**< 0.0001**	0.818	0.406	0.87	0.4356	0.026	0.001
Beta1	1.20	0.2816	0.035	< 0.001	259.25	**< 0.0001**	0.887	0.578	0.77	0.4800	0.023	0.001
Beta2	1.27	0.2677	0.037	0.001	159.75	**< 0.0001**	0.829	0.333	0.59	0.6244	0.018	< 0.001
Schlafstadium N3												
Delta	2.53	0.1209	0.071	0.002	235.41	**< 0.0001**	0.877	0.587	1.94	0.1396	0.056	0.002
Theta	1.51	0.2277	0.044	0.001	207.05	**< 0.0001**	0.863	0.593	0.57	0.5950	0.017	0.001
Alpha	3.64	0.0651	0.099	0.002	211.98	**< 0.0001**	0.865	0.467	0.97	0.4013	0.028	< 0.001
Beta1	3.33	0.0771	0.092	0.002	209.71	**< 0.0001**	0.864	0.534	0.92	0.4184	0.027	0.001
Beta2	1.54	0.2228	0.045	0.003	86.21	**< 0.0001**	0.723	0.270	0.70	0.5523	0.021	0.001
Schlafstadium NREM												
Delta	2.94	0.0958	0.082	0.003	227.03	**< 0.0001**	0.873	0.526	1.94	0.1435	0.055	0.002
Theta	1.88	0.1798	0.054	0.001	211.40	**< 0.0001**	0.865	0.579	0.86	0.4479	0.025	0.001
Alpha	4.53	**0.0409**	0.121	0.002	153.94	**< 0.0001**	0.823	0.412	0.72	0.5078	0.021	< 0.001
Beta1	3.23	0.0815	0.089	0.001	250.51	**< 0.0001**	0.884	0.569	0.71	0.5078	0.021	0.001
Beta2	1.06	0.3103	0.031	0.001	158.29	**< 0.0001**	0.827	0.340	0.36	0.7892	0.011	< 0.001
Schlafstadium REM												
Delta	1.74	0.1961	0.050	0.002	173.75	**< 0.0001**	0.840	0.633	1.08	0.3530	0.032	0.002
Theta	2.15	0.1521	0.061	0.001	245.00	**< 0.0001**	0.881	0.658	0.95	0.4107	0.028	0.001
Alpha	1.29	0.2639	0.038	0.001	124.45	**< 0.0001**	0.790	0.406	1.36	0.2637	0.040	0.001
Beta1	0.45	0.5056	0.014	< 0.001	89.88	**< 0.0001**	0.731	0.251	0.68	0.5421	0.020	< 0.001
Beta2	2.56	0.1191	0.072	0.001	179.77	**< 0.0001**	0.845	0.341	0.55	0.6223	0.016	< 0.001

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; pGG = Signifikanzwert (Greenhouse-Geisser korrigiert); η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

X.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf den Schlaf

Die vorliegende Auswertung zur Makrostruktur des Schlafes hat ergeben, dass lediglich die Dauer des Schlafstadiums N1 (in min) in der zweiten Nachthälfte statistisch signifikant mit der Exposition variierte. Im Vergleich zu Sham war der N1-Anteil unter der Wi-Fi-Exposition leicht erhöht. Die Erhöhung des N1-Anteils ging einher mit einer leicht verkürzten Dauer des Stadiums Wach am Ende der Nacht. Während sich dieser Effekt in der WASO nicht widerspiegelte (keine signifikanten Unterschiede, siehe Tab. X.7), wird er bei Betrachtung der Variable WAFA (Wachzeit nach finalem Erwachen; *Wake after final awakening*) wesentlich deutlicher. Unter Sham betrug die WAFA (MW ± SD) 3.6 ± 14.1 min, unter Wi-Fi hingegen nur 0.9 ± 3.4 min. Obwohl auch dieser Unterschied statistisch nicht signifikant war, kann vermutet werden, dass zum Ende der Wi-Fi-Nächte zugunsten des Stadiums Wach etwas mehr Schlaf, darunter auch das Schlafstadium N1, gescort wurde, wie in Abb. X.12 insbesondere an den Daten von zwei Probanden zu erkennen ist. Für das Schlafstadium N1 könnte dann dieser Zuwachs den statistisch signifikanten Unterschied ausgemacht haben. Während ein vermehrtes Auftreten vom Schlafstadium N1 unter Exposition in der Regel als negativ eingestuft wird, kann dieses Ergebnis bei genauerer Betrachtung dagegen tendenziell sogar als positiver Effekt interpretiert werden.

Mit Hinblick auf die Analyse der Schlafstadien-spezifischen Powerspektralwerte des Schlaf EEGs führte eine Wi-Fi-Exposition während der gesamten Nacht lediglich zu einer Reduktion der globalen Power im Alpha Frequenzband (8.00 – 11.75 Hz) im NREM Schlaf im Vergleich zu Sham. Aufgrund der Vielzahl der Tests, die in diesem Zusammenhang durchgeführt wurden, könnte dieses Ergebnis als Zufallsbefund gewertet werden.

Der signifikante Effekt der Expositionsabfolge für die Power im breiten Schlafspindelfrequenzbereich im Stadium N2 spiegelt einen Unterschied zwischen den beiden Expositionssequenzen wider, der allerdings den gleichen Trend zwischen den Expositionsbedingungen aufweist (für beide Expositionssequenzen ist der Wert unter Wi-Fi kleiner als unter Sham). Die über beide Messnächte und über alle Regionen gemittelte Power war lediglich bei den Probanden, die die Expositionen in der Abfolge 2 (Sham gefolgt von Wi-Fi) durchlaufen haben, leicht erhöht. Anders ausgedrückt bedeutet dieser Effekt, dass die Power unter Wi-Fi-Exposition über die beiden Messnächte zugenommen hat, während die Power unter Sham in etwa dem gleichen Maße abgenommen hat (Darstellung der EXPOSITION*MESSNACHT Interaktion in Abb. X.13b). Da sich dieser Effekt einerseits nur schwer erklären lässt und andererseits auch nur ausschließlich die Power im breiten Schlafspindelfrequenzbereich im Stadium N2 betroffen war, kann ebenfalls von einem Zufallsbefund ausgegangen werden.

Leichte physiologische Variationen in Abhängigkeit von der Exposition konnten in der TETRA-Studie gefunden werden (Danker-Hopfe und Dorn, 2014). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stehen also im Einklang mit den Ergebnissen anderer von uns durchgeführten Studien, in denen ebenfalls keine Anhaltspunkte gefunden werden konnten, dass eine die gesamte Nacht andauernde Hochfrequenzexposition zu gesundheitlich relevanten physiologischen Veränderung im Schlaf-EEG führt.

X.3 Gedächtniskonsolidierung

X.3.1 Deklaratives Gedächtnis

Die im Gedächtnistest am Abend und am Morgen korrekt erinnerten Wortpaare sind in Tab. X.15 zusammengestellt. Eine univariate Auswertung ergab, dass die Zahl der korrekt erinnerten Wortpaare am Morgen unabhängig von der Exposition statistisch signifikant größer war als am Abend (Abb. X.18).

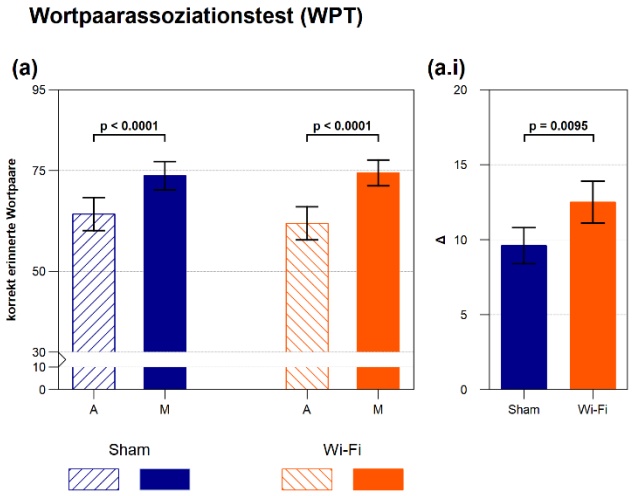


Abb. X.18: Ergebnisse der univariaten Auswertung des Wortpaarassoziationstests. (a): Anzahl korrekt erinnerter Wortpaare am Abend (A) und am Morgen (M) getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens“ minus „abends“) der korrekt erinnerten Wortpaare getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

Tab. X.15: Deskriptive Statistiken zu den Ergebnisparametern aus den in der Studie durchgeführten Gedächtnistests. Die Daten sind getrennt nach Zeitpunkt der Datenerhebung (abends und morgens) sowie nach Exposition (WiFi und Sham) dargestellt. N = 30 Versuchspersonen.

			Sham				WiFi			
Gedächtnisaufgabe	Tageszeitpunkt	Parameter	MW	SD	Median	P25; P75	MW	SD	Median	P25; P75
Deklarativ	Abends	Korrekt erinnerte WP	64.2	22.7	68.5	47.0; 82.0	61.9	22.7	70.0	40.0; 81.0
	Morgens	Korrekt erinnerte WP	73.7	18.9	80.5	54.0; 91.0	74.4	17.5	81.0	58.0; 89.0
Prozedural	Abends	Korrekte Sequenzen	15.5	3.8	15.3	13.3; 16.7	15.5	2.8	15.9	14.0; 17.3
	Morgens	Korrekte Sequenzen	17.3	2.8	17.5	15.0; 19.0	18.0	2.6	18.2	17.0; 19.7
Emotional	Abends	MA (*alle Gesichtsausdrücke)*	0.60	0.42	0.70	0.55; 0.84	0.71	0.17	0.74	0.61; 0.81
	Morgens	MA (*alle Gesichtsausdrücke)*	0.70	0.36	0.81	0.65; 0.87	0.74	0.17	0.77	0.65; 0.87
	Abends	MA (*ärgerliche Gesichtsausdrücke)*	0.60	0.40	0.73	0.55; 0.82	0.69	0.17	0.73	0.64; 0.82
	Morgens	MA (*ärgerliche Gesichtsausdrücke)*	0.63	0.35	0.73	0.55; 0.82	0.67	0.19	0.73	0.45; 0.82
	Abends	MA (*neutrale Gesichtsausdrücke)*	0.51	0.39	0.60	0.45; 0.82	0.62	0.21	0.64	0.55; 0.82
	Morgens	MA (*neutrale Gesichtsausdrücke)*	0.66	0.36	0.73	0.64; 0.91	0.70	0.17	0.73	0.55; 0.82
	Abends	MA (*glückliche Gesichtsausdrücke)*	0.58	0.44	0.73	0.55; 0.82	0.69	0.19	0.73	0.55; 0.82
	Morgens	MA (*glückliche Gesichtsausdrücke)*	0.70	0.33	0.82	0.64; 0.82	0.73	0.19	0.82	0.64; 0.82

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil

Die Analyse der Veränderungen über Nacht zeigte außerdem, dass die Zunahme unter Wi-Fi-Exposition signifikant stärker ausgeprägt war als unter der Scheinexposition (Abb. X.18). In einer ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE sowie den Innersubjektfaktoren EXPOSITION, ZEIT und deren Interaktion war der Einfluss der ZEIT sowie der Interaktionseffekt zwischen EXPOSITION und ZEIT statistisch signifikant (Tab. X.16 und Abb. X.19).

Tab. X.16: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der im Wortpaarassoziationstest untersuchten deklarativen Gedächtnisleistung. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 30 Versuchspersonen.

	Korrekt erinnerte Wortpaare			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.22	0.6463	0.008	0.007
Exposition	0.29	0.5924	0.010	0.000
Zeit	77.90	**<.0001**	0.736	0.068
Exposition*Zeit	9.01	**0.0056**	0.243	0.001

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

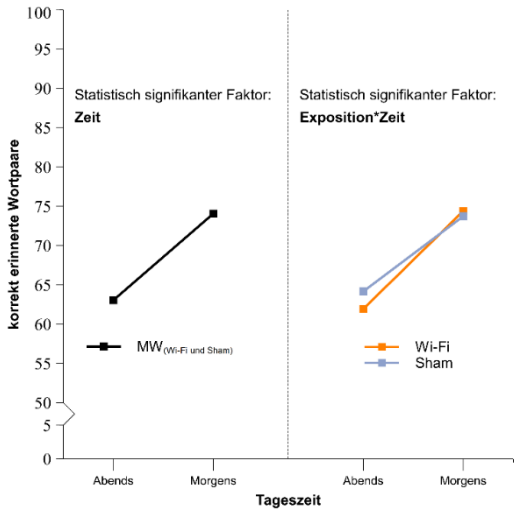


Abb. X.19: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT und der Interaktion EXPOSITION*ZEIT für die Anzahl korrekt erinnerter Wortpaare.

X.3.2 Prozedurales Gedächtnis

Die deskriptiven Statistiken zu der Anzahl der korrekt wiedergegebenen Sequenzen aufgeschlüsselt nach Untersuchungszeitpunkt und Exposition sind Tab X.15 zu entnehmen. Die Auswertung der Daten mittels ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE, den Innersubjektfaktoren EXPOSITION und ZEIT sowie deren Interaktion ergab, dass die Leistung in dieser prozeduralen Lernaufgabe nur in Abhängigkeit von der ZEIT variierte (Tab. X.17).

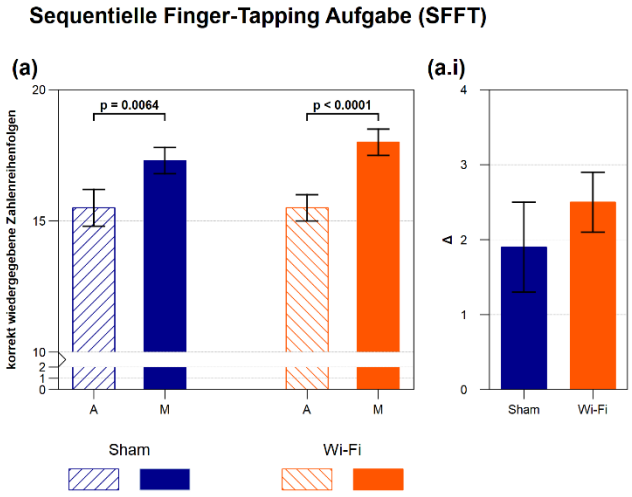


Abb. X.20: Ergebnisse der univariaten Auswertung der sequenziellen Finger-Tapping Aufgabe. (a): Anzahl korrekt wiedergegebener Zahlenreihenfolgen am Abend (A) und am Morgen (M) getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens“ minus „abends“) der korrekt wiedergegebenen Zahlenreihenfolgen getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

Tab. X.17: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der in der sequenziellen Finger-Tapping Aufgabe untersuchten prozeduralen Gedächtnisleistung. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 30 Versuchspersonen.

	Korrekt wiedergegebene Sequenzen			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.04	0.8359	0.001	0.001
Exposition	0.35	0.5572	0.012	0.002
Zeit	35.89	**<.0001**	0.562	0.118
Exposition*Zeit	0.78	0.3847	0.027	0.003

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

Wie Tab. X.15, Abb. X.20 und Abb. X.21 erkennen lassen, ist die Zahl korrekt wiedergegebener Sequenzen am Morgen höher als am Abend. Obwohl die Veränderung über Nacht unter der Wi-Fi-Expositionsbedingung etwas höher ist, ist dieser Unterschied nicht signifikant, was sich auch in der nicht signifikanten Interaktion zwischen den Faktoren EXPOSITION und ZEIT widerspiegelt.

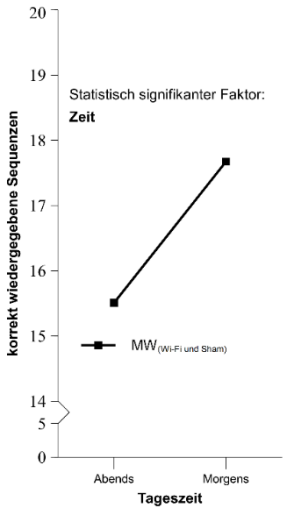


Abb. X.21: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors ZEIT für die Anzahl korrekt wiedergegebener Sequenzen.

X.3.3 Emotionales Gedächtnis

Die Memory Accuracy für alle emotionalen Stimuli sowie getrennt nach positiven, neutralen und negativen Gesichtern sind für die Testleistungen am Abend und am Morgen nach Expositionsbedingungen in Tab. X.15 dargestellt. Für drei der vier untersuchten Testbedingungen d.h. alle außer der Memory Accuracy für negative Gesichter, ließ sich in der ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE, den Innersubjektfaktoren EXPOSITION und ZEIT sowie deren Interaktion ein signifikanter Effekt in Abhängigkeit von der ZEIT nachweisen (Tab. X.18). Dieser Effekt war für neutrale Gesichter unter beiden Expositionsbedingungen gleichermaßen zu beobachten, wie die univariate Auswertung ergab. Für alle Gesichter konnten dagegen auf univariater Ebene keine Unterschiede zwischen abends und morgens festgestellt werden, während dieser Effekt für positive Gesichter unter Sham zu beobachten war (Abb. X22). Wie den Abb. X.22 und X.23 zu entnehmen ist, ist die Memory Accuracy in allen Fällen am Morgen höher als am Abend.

Tab. X.18: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der in Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung untersuchten emotionalen Gedächtnisleistung. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 30 Versuchspersonen.

	MA – alle Gesichter				MA – negative Gesichter			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsreihenfolge	0.09	0.7632	0.003	0.002	0.52	0.4789	0.018	0.009
Exposition	0.98	0.3303	0.034	0.012	0.91	0.3496	0.031	0.011
Zeit	4.70	**0.0388**	0.144	0.013	0.01	0.9300	0.000	0.000
Exposition*Zeit	1.01	0.3224	0.035	0.003	0.50	0.4855	0.018	0.001

	MA – neutrale Gesichter				MA – positive Gesichter			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsreihenfolge	0.01	0.9302	0.000	0.000	0.01	0.9391	0.000	0.000
Exposition	0.98	0.3306	0.034	0.011	0.82	0.3730	0.028	0.010
Zeit	7.42	**0.0110**	0.209	0.035	5.93	**0.0215**	0.175	0.017
Exposition*Zeit	0.65	0.4259	0.023	0.002	1.41	0.2443	0.048	0.004

MA = Memory Accuracy; F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

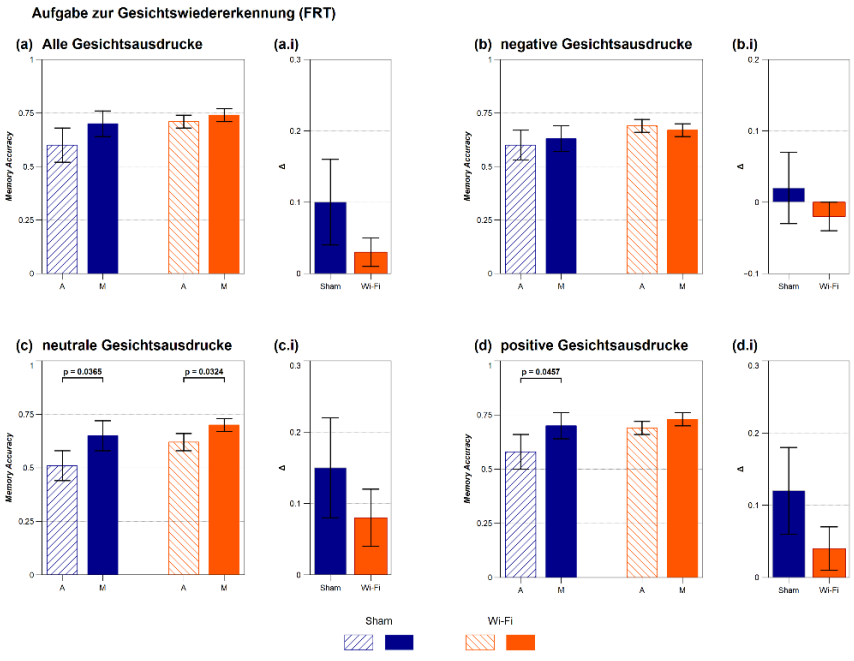


Abb. X.22: Ergebnisse der univariaten Auswertung der Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung. (a-d): Memory Accuracy am Abend (A) und am Morgen (M) für alle Teilaufgaben getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.- d.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens" minus „abends") der Memory Accuracy für alle Teilaufgaben getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

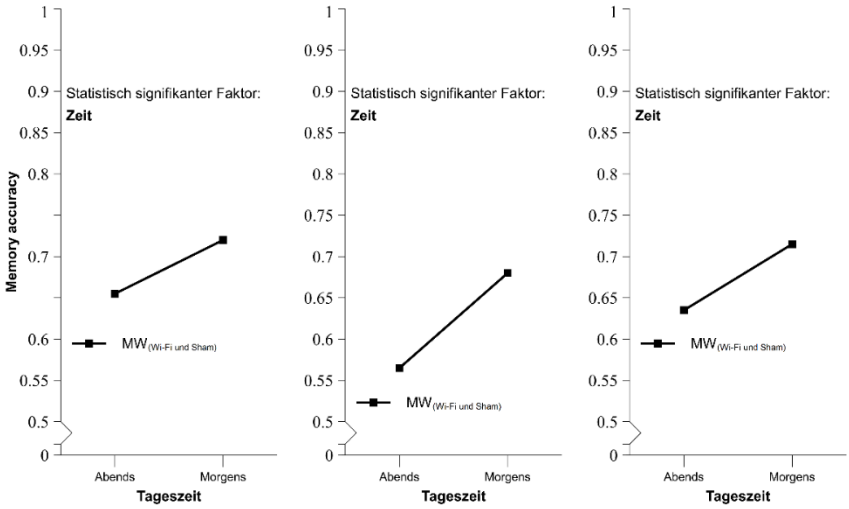


Abb. X.23: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors ZEIT für die Memory Accuracy von allen Gesichtsausdrucken (links), neutralen Gesichtsausdrucken (Mitte) und positiven Gesichtsausdrucken (rechts).

X.3.4 Kontrolltests

Wie in Kap. VIII 3.4. beschrieben, wurden zwei Kontrolltests durchgeführt, um zu überprüfen, ob mögliche unterschiedliche Lernerfolge vielleicht nicht ausschließlich auf einer durch Exposition veränderten Gedächtniskonsolidierung beruhen, sondern auch einer Beeinflussung der allgemeinen kognitiven Funktionen sowie der Leistungsfähigkeit.

X.3.4.1 Digit Span Test (DST)

Die deskriptiven Statistiken zu den Ergebnissen im Digit Span Test sind Tab. X.19 aufgeschlüsselt nach Tageszeit und Expositionsbedingung zu entnehmen. Die in Tab. X.20 zusammengefassten Ergebnisse zum Einfluss des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE, den Innersubjektfaktoren EXPOSITION und ZEIT sowie deren Interaktion auf das Arbeitsgedächtnis, das mit dem Digit Span Test überprüft wurde, belegen, dass keiner der untersuchten Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse dieses Tests hatte. Eine univariate Auswertung der Daten führte auch zu keinem statistisch signifikanten Unterschied (siehe Abb. X.24).

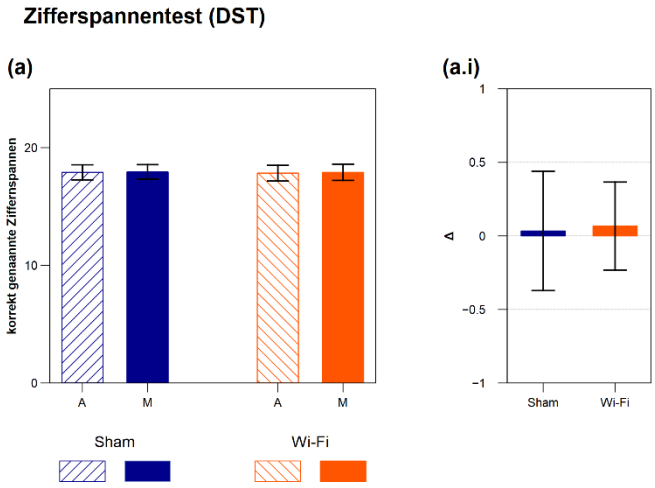


Abb. X.24: Ergebnisse der univariaten Auswertung der Zahlenspannentests. (a): Anzahl korrekt genannten Zahlenspannen am Abend (A) und am Morgen (M) getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens“ minus „abends“) der korrekt genannten Zahlenspannen getrennt nach Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

X.3.4.2 Regensburger Wortflüssigkeitstest (RWT)

Nach Tageszeit und Exposition aufgeschlüsselte deskriptive Statistiken der Ergebnisse des Regensburger Wortflüssigkeitstests sind Tab. X.19 zu entnehmen. Die Ergebnisse der ANOVA mit Messwiederholung zum Einfluss mit dem Zwischensubjektfaktor EXPOSITIONSABFOLGE, den Innersubjektfaktoren EXPOSITION und ZEIT sowie deren Interaktion auf die formal-lexikalische und die semantisch-kategorielle Wortflüssigkeit sind Tab. X.21 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass unabhängig von der Exposition der Faktor ZEIT einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse des Untertests zur semantisch-kategoriellen Wortflüssigkeit hat. Am Morgen werden weniger Hobbies genannt als Berufe am Abend (Abb. X.25 und X.26). Obwohl die beiden Kategorien inhaltlich vergleichbar sind, könnte dieses Ergebnis auch (zusätzlich) einen Aufgabeneffekt widerspiegeln. Für die formallexikalische Wortflüssigkeit zeigt sich ein Interaktionseffekt zwischen der EXPOSITION und der ZEIT. Während sich die formallexikalische Wortflüssigkeit unter Sham vom Abend zum Morgen verbesserte, blieb sie unter der WLAN-Expositionsbedingung unverändert, war aber am Abend vor der WiFi Exposition bereits statistisch signifikant höher als vor der Sham Exposition (Abb. X.25 und X.26).

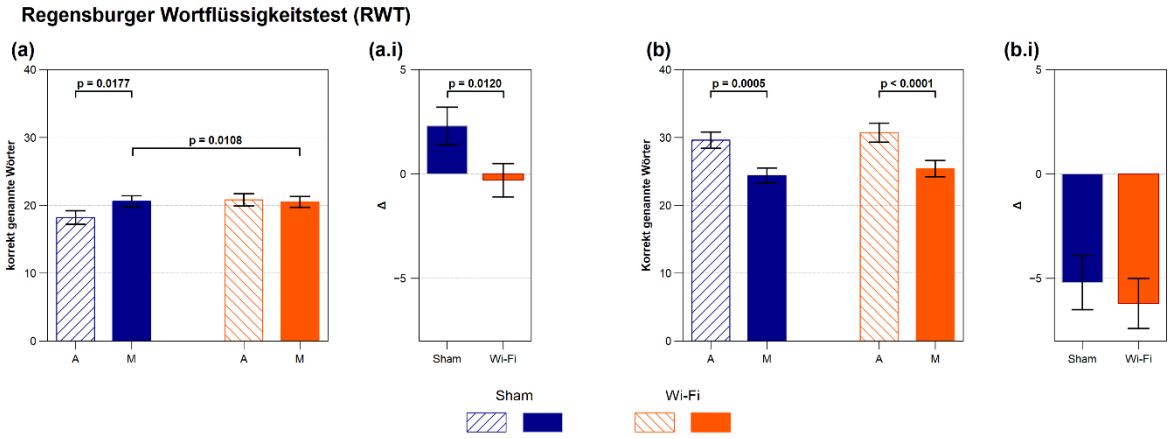


Abb. X.25: Ergebnisse der univariaten Auswertung des Regensburger Wortflüssigkeitstests. (a-b): Anzahl korrekt genannten Wörter am Abend (A) und am Morgen (M) für die formal-lexikalische (a) und die semantisch-kategorielle (b) Wortflüssigkeit getrennt nach Expositionsbedingung, (a.i – b.i.): Veränderung über Nacht (Δ = „morgens" minus „abends") der korrekt genannten Wörter getrennt nach Kategorie und Expositionsbedingung; Daten sind angegeben als MW ± SE.

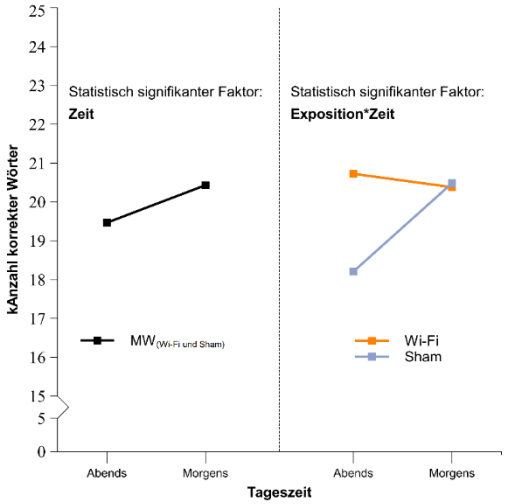


Abb. X.26: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT für die Anzahl korrekt genannter Wörter bei der formal-lexikalischen Teilaufgabe (links) und der Interaktion der Faktoren EXPOSITION*ZEIT für die Anzahl korrekt genannter Wörter bei der semantisch-kategoriellen Teilaufgabe (rechts).

Tab. X.19: Deskriptive Statistiken zu den Ergebnisparametern aus den in der Studie durchgeführten Kontrolltests. Die Daten sind getrennt nach Zeitpunkt der Datenerhebung (abends und morgens) sowie nach Exposition (WiFi und Sham) dargestellt. N = 30 Versuchspersonen.

			Sham				WiFi			
Kontrollaufgabe	Tageszeitpunkt	Parameter	MW	Stabw	Median	P25; P75	MW	Stabw	Median	P25; P75
DST	Abends	Korrekte Zahlenreihenfolgen	17.9	3.5	18.0	16.0; 21.0	17.8	3.6	19.0	15.0; 20.0
	Morgens	Korrekte Zahlenreihenfolgen	17.9	3.4	18.0	16.0; 20.0	17.9	3.8	19.0	15.0; 21.0
RWT	Abends	P-Wörter (*formallexikalisch)*	18.2	5.3	19.0	15.0; 21.0	20.7	4.9	20.0	18.0; 23.0
	Morgens	M-Wörter (*formallexikalisch)*	20.5	4.4	20.0	18.0; 24.0	20.4	4.3	21.0	17.0; 23.0
	Abends	Berufe (*semantisch-kategoriell)*	29.6	6.4	29.5	24.0; 35.0	30.7	7.5	30.0	24.0; 36.0
	Morgens	Hobbys (*semantisch-kategoriell)*	24.4	6.2	25.0	22.0; 27.0	25.4	6.7	24.5	21.0; 29.0

MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; P25 = 25. Perzentil; P75 = 75. Perzentil

Tab. X.20: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den korrekt erinnerten Zahlenreihenfolgen. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. N = 30 Versuchspersonen.

	Korrekt erinnerte Zahlenreihenfolgen			
Faktor	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.12	0.7267	0.004	0.004
Exposition	0.15	0.7036	0.005	0.000
Zeit	0.01	0.9316	0.000	0.000
Exposition*Zeit	0.03	0.8609	0.001	0.000

F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

Tab. X.21: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den korrekt wiedergegebenen Sequenzen. Für die Analyse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung inklusive des Zwischensubjektfaktors EXPOSITIONSABFOLGE verwendet, allerdings ist auf eine Berichterstattung der Interaktionen mit diesem Faktor verzichtet worden. Statistisch signifikante Ergebnisse sind fett markiert. N = 30 Versuchspersonen.

	RWT - FL				RWT - SK			
Faktor	$F_{(1,27)}$	p	η^2_p	η^2_G	$F_{(1,28)}$	p	η^2_p	η^2_G
Expositionsabfolge	0.14	0.7146	0.005	0.003	1.23	0.2768	0.042	0.028
Exposition	1.94	0.1747	0.065	0.009	1.51	0.2299	0.051	0.005
Zeit	1.64	0.2112	0.055	0.010	28.66	**<.0001**	0.506	0.142
Exposition*Zeit	6.35	**0.0179**	0.185	0.018	0.02	0.8974	0.001	0.000

FL = Formal-lexikalisch; SK = Semanstisch-kategoriell; F = F-Statistik (die Zahl der Freiheitsgrade ist in Klammern angegeben); p = Signifikanzwert; η^2_p = Partielles Eta-Quadrat; η^2_G = Generalisiertes Eta-Quadrat [nach Lakens (2013) sollte nur η^2_G mit den folgenden Benchmarks nach Cohen (1988) verglichen werden: $\eta^2_G < 0.010$ = kein Effekt, $0.010 \leq \eta^2_G < 0.060$ = kleiner Effekt, $0.060 \leq \eta^2_G < 0.140$ = mittlerer Effekt und $\eta^2_G \geq 0.140$ = großer Effekt].

X.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Exposition auf die Gedächtnis- und Kontrolltests

Die Analysen der Gedächtnistests haben gezeigt, dass lediglich der schlafbezogene Konsolidierungsprozess deklarativer Gedächtnisinhalte von der Wi-Fi-Exposition betroffen war. Die Veränderung der Gedächtnisleistung über Nacht war unter der Wi-Fi-Exposition statistisch signifikant größer als unter der Sham-Bedingung. Zu erwähnen ist, dass die erzielten (expositionsunabhängigen) Abendwerte unter den beiden Expositionsbedingungen voneinander abwichen, wobei diese

Abweichung aber statistisch nicht signifikant war. Diese verschiedenen Ausgangslagen haben dann möglicherweise zu den unterschiedlichen „expositionsbedingten“ Zuwächsen geführt. Da sich allerdings zu diesem Befund keine Entsprechung auf physiologischer Ebene (langsame Oszillationen, Power in den beiden Schlafspindelfrequenzen) finden ließ, könnte diese Beobachtung als Zufallsbefund gewertet werden.

Der bei der Auswertung der formal-lexikalischen Wortflüssigkeit als Teilaufgabe des Regensburger Wortflüssigkeitstests beobachtete Expositionseffekt in Interaktion mit der Zeit ist ausschließlich der Veränderung über Nacht unter der Sham-Exposition zuzuschreiben. Unter der Wi-Fi-Exposition fand dagegen so gut wie keine Veränderung statt. Der Wert am Abend war bereits so hoch wie unter Sham und Wi-Fi-Exposition am Morgen. Da Wi-Fi Exposition häufiger als zweite Exposition in der Abfolge vorkam, ist hier nicht auszuschließen, dass die Ergebnisse am Abend auch einen Lerneffekt widerspiegeln.

XI Schlussfolgerung

Insgesamt zeigen die Daten, dass die Hirnaktivität gemessen an Powerspektralwerten des Schlaf-EEGs zwischen den Expositionsbedingungen variieren kann, was zu einer Vielzahl an Untersuchungsergebnissen zum Mobil- und Digitalfunk passt. Diese leichten physiologischen Veränderungen lassen sich aber nicht im Sinne eines schlafstörenden Effekts von Wi-Fi-Exposition interpretieren. Auch geben die Ergebnisse keinen Anlass zur Annahme, dass die schlafbezogene Gedächtniskonsolidierung durch Wi-Fi negativ beeinflusst wird.

XII Literaturverzeichnis

Achermann, P., Borbely, A.A., 1997. Low-frequency (< 1 Hz) oscillations in the human sleep electroencephalogram. Neuroscience 81, 213-222.

Adamczyk, M., Genzel, L., Dresler, M., Steiger, A., Friess, E., 2015. Automatic Sleep Spindle Detection and Genetic Influence Estimation Using Continuous Wavelet Transform. Front Hum Neurosci 9, 624.

Anderer, P., Gruber, G., Parapatics, S., Woertz, M., Miazhynskaia, T., Klosch, G., Saletu, B., Zeitlhofer, J., Barbanoj, M.J., Danker-Hopfe, H., Himanen, S.L., Kemp, B., Penzel, T., Grozinger, M., Kunz, D., Rappelsberger, P., Schlogl, A., Dorffner, G., 2005. An E-health solution for automatic sleep classification according to Rechtschaffen and Kales: validation study of the Somnolyzer 24 x 7 utilizing the Siesta database. Neuropsychobiology 51, 115-133.

Anderer, P., Moreau, A., Woertz, M., Ross, M., Gruber, G., Parapatics, S., Loretz, E., Heller, E., Schmidt, A., Boeck, M., Moser, D., Kloesch, G., Saletu, B., Saletu-Zyhlarz, G.M., Danker-Hopfe, H., Zeitlhofer, J., Dorffner, G., 2010. Computer-assisted sleep classification according to the standard of the American Academy of Sleep Medicine: validation study of the AASM version of the Somnolyzer 24 x 7. Neuropsychobiology 62, 250-264.

Aschenbrenner, S., Tucha, O., Lange, K.W., 2000. Regensburger Wortflüssigkeits-Test (RWT); Handanweisung. Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen.

Bamdad, K., Adel, Z., Esmaeili, M., 2019. Complications of nonionizing radiofrequency on divided attention. J Cell Biochem 120, 10572-10575.

Berry, R.B., Albertario, C.L., Harding, S.M., Lloyd, R.M., Plante, D.T., Quan, S.F., Troester, M.M., Vaughn, B.V., for the American Academy of Sleep Medicine, 2018. The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications, Version 2.5. American Academy of Sleep Medicine, Darien, IL.

Bolte, J.F., Eikelboom, T., 2012. Personal radiofrequency electromagnetic field measurements in The Netherlands: exposure level and variability for everyday activities, times of day and types of area. Environ Int 48, 133-142.

Bond, A., Lader, M., 1974. The use of analogue scales in rating subjective feelings. British Journal of Medical Psychology 47, 211-218.

Brähler, E., Hinz, A., Scheer, J.W., 2008. GBB-24. Der Giessener Beschwerdebogen, 3. überarbeitete und neu normierte Auflage ed. Hans Huber, Hogrefe AG, Bern.

Brähler, E., Scheer, J.W., 1979. Skalierung psychosomatischer Beschwerdekomplexe mit dem Giessener Beschwerdebogen (GBB). Psychother Med Psychol 29, 14-27.

Breckenkamp, J., Blettner, M., Schuz, J., Bornkessel, C., Schmiedel, S., Schlehofer, B., Berg-Beckhoff, G., 2012. Residential characteristics and radiofrequency electromagnetic field exposures from bedroom measurements in Germany. Radiat Environ Biophys 51, 85-92.

Buysse, D.J., Reynolds, C.F., 3rd, Monk, T.H., Berman, S.R., Kupfer, D.J., 1989. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. Psychiatry Res 28, 193-213.

Cohen, J., 1988. Statistical power analysis for the behavioral sciences. L. Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J.

Danker-Hopfe, H., Dorn, H., 2014. Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen - Abschlussbericht.

Danker-Hopfe, H., Dorn, H., Bolz, T., Peter, A., Hansen, M.L., Eggert, T., Sauter, C., 2016. Effects of mobile phone exposure (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on polysomnography based sleep quality: An intra- and inter-individual perspective. Environ Res 145, 50-60.

Diekelmann, S., Born, J., 2010. The memory function of sleep. Nat Rev Neurosci 11, 114-126.

ETSI, 2012. European Telecommunications Standards Institute Standard (ETSI) EN 301893 - Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive, Sophia Antipolis Cedex - FRANCE.

Foster, K.R., Moulder, J.E., 2013. Wi-Fi and health: review of current status of research. Health Phys 105, 561-575.

Gasser, T., Bacher, P., Mocks, J., 1982. Transformations towards the normal distribution of broad band spectral parameters of the EEG. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 53, 119-124.

Härting, C., Markowitsch, H.J., Neufeld, H., Calabrese, P., Deisinger, K., Kessler, J., 2000. Deutsche Adaptation der revidierten Fassung der Wechsler Memeory Scale (WMS-R). Hans Huber Verlag, Göttingen.

Hoffmann, R.M., Müller, T., Hajak, G., Cassel, W., Arbeitsgruppe Diagnostik der Deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin DGSM, 1997. Abend-Morgenprotokolle in Schlafforschung und Schlafmedizin—Ein Standardinstrument für den deutschsprachigen Raum. Somnologie 1, 103-109.

Horn, W., 1983. Leistungsprüfsystem : L-P-S, 2. Auflage ed. Verl. für Psychologie, Hogrefe, Göttingen.

Horne, J.A., Ostberg, O., 1976. A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. Int J Chronobiol 4, 97-110.

Hosseini, M.A., Hosseini, A., Jarideh, S., Argasi, H., Shekoohi-Shooli, F., Zamani, A., Taeb, S., Haghani, M., 2019. Evaluating Short-Term Exposure to Wi-Fi Signals on Students' Reaction Time, Short-Term Memory and Reasoning Ability. Radiat Prot Dosimetry.

Huss, A., Kuchenhoff, J., Bircher, A., Heller, P., Kuster, H., Niederer, M., Scartazzini, G., Schwarzenbach, S., Waeber, R., Wegmann, L., Braun-Fahrlander, C., 2004. Symptoms attributed to the environment--a systematic, interdisciplinary assessment. Int J Hyg Environ Health 207, 245-254.

Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson Jr, A.L., Quan, S.F., for the American Academy of Sleep Medicine, 2007. The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications. American Academy of Sleep Medicine, Westchester, IL.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2004. Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks - jährliche Umfragen -. Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2003.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2005a. Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks - jährliche Umfragen -. Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2004.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2005b. Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks - jährliche Umfragen -. Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2005.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2006. Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks - jährliche Umfragen -. Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2006.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2010. Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks - jährliche Umfragen -. Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2009.

Institut für Markt- und Sozialforschung GmbH, 2014. Differenzierte Betrachtung der Nutzung und der Wahrnehmung des Mobilfunks.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 2020. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys 118, 483-524.

Jasper, H.H., 1958. Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography (Appendix: The ten-twenty electrode system of the International Federation). Electroencephalography and clinical neurophysiology 10, 371-375.

Jobert, M., Wilson, F.J., Roth, T., Ruigt, G.S., Anderer, P., Drinkenburg, W.H., Bes, F.W., Brunovsky, M., Danker-Hopfe, H., Freeman, J., van Gerven, J.M., Gruber, G., Kemp, B., Klosch, G., Ma, J., Penzel, T., Peterson, B.T., Schulz, H., Staner, L., Saletu, B., Svetnik, V., Committee, I.P.-E.G., 2013. Guidelines for the recording and evaluation of pharmaco-sleep studies in man: the International Pharmaco-EEG Society (IPEG). Neuropsychobiology 67, 127-167.

Johns, M.W., 1991. A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. Sleep 14, 540-545.

Kadel, R.P., Kip, K.E., 2012. SAS Macro to Compute Effect Size (Cohen's d) and its Confidence Interval from Raw Survey Data., Southeast SAS® Users Group (SESUG) Conference, Durham, NC.

Krohne, H.W., Egloff, B., Kohlmann, C.-W., Tausch, A., 1996. Untersuchungen mit einer deutschen Version der "Positive and Negative Affect Schedule" (PANAS). [Investigations with a German version of the Positive and Negative Affect Schedule (PANAS).]. Diagnostica 42, 139-156.

Lakens, D., 2013. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. Front Psychol 4, 863.

Laux, L., Glanzmann, P., Schaffner, P., Spielberger, C.D., 1981. Das State-Trait-Angstinventar [Testmappe mit Handanweisung, Fragebogen STAI-G Form X 1 und Fragebogen STAI-G Form X 2]. Beltz, Weinheim.

Lehrl, S., 2005. Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest : MWT-B, 5. Auflage ed. Spitta, Balingen.

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.

Lundqvist, L., Flykt, A., Öhman, A., 1998. The Karolinska directed emotional faces (KDEF). CD ROM from Department of Clinical Neuroscience, Psychology section, Karolinska Institutet 91, 2.2.

Lustenberger, C., Murbach, M., Durr, R., Schmid, M.R., Kuster, N., Achermann, P., Huber, R., 2013. Stimulation of the brain with radiofrequency electromagnetic field pulses affects sleep-dependent performance improvement. Brain Stimul 6, 805-811.

Markakis, I., Samaras, T., 2013. Radiofrequency exposure in Greek indoor environments. Health Phys 104, 293-301.

Marshall, L., Helgadottir, H., Molle, M., Born, J., 2006. Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. Nature 444, 610-613.

Marshall, L., Molle, M., Hallschmid, M., Born, J., 2004. Transcranial direct current stimulation during sleep improves declarative memory. J Neurosci 24, 9985-9992.

Olejnik, S., Algina, J., 2003. Generalized eta and omega squared statistics: measures of effect size for some common research designs. Psychol Methods 8, 434-447.

Östberg, O., 1976. Zur Typologie der circadianen Phasenlage, in: Hildebrandt, G. (Ed.), Biologische Rhythmen und Arbeit. Springer, Wien.

Papageorgiou, C.C., Hountala, C.D., Maganioti, A.E., Kyprianou, M.A., Rabavilas, A.D., Papadimitriou, G.N., Capsalis, C.N., 2011. Effects of wi-fi signals on the p300 component of event-related potentials during an auditory hayling task. J Integr Neurosci 10, 189-202.

Pastotter, B., Bauml, K.H., 2016. Reversing the testing effect by feedback: Behavioral and electrophysiological evidence. Cogn Affect Behav Neurosci 16, 473-488.

Rasch, B., Born, J., 2013. About sleep's role in memory. Physiol Rev 93, 681-766.

Rasch, B., Friese, M., Hofmann, W., Naumann, E., 2010. Quantitative Methoden Band 2 (G*Power-Ergänzungen; Kapitel 7: Varianzanalyse mit Messwiederholung), 3. Auflage ed. Springer, Heidelberg.

Rohrig, B., du Prel, J.B., Wachtlin, D., Kwiecien, R., Blettner, M., 2010. Sample Size Calculation in Clinical Trials Part 13 of a Series on Evaluation of Scientific Publications. Dtsch Arztebl Int 107, 552-556.

Roosli, M., Moser, M., Baldinini, Y., Meier, M., Braun-Fahrlander, C., 2004. Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey. Int J Hyg Environ Health 207, 141-150.

Rosenthal, R., 1993. Cumulating evidence, A handbook for data analysis in the behavioral sciences: Methodological issues. Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, NJ, US, pp. 519-559.

Schmid, G., Hirtl, R., Bueno-Lopez, A., Dorn, H., Eggert, T., Danker-Hopfe, H., 2020. Design and Dosimetric Analysis of an Exposure Facility for Investigating Possible Effects of 2.45 GHz Wi-Fi Signals on Human Sleep. Bioelectromagnetics.

Schulz, K.F., Grimes, D.A., 2005. Epidemiology 1 - Sample size calculations in randomised trials: mandatory and mystical. Lancet 365, 1348-1353.

Scientific Committee on Emerging Newly Identified Health Risks, 2015. Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), in: European, C. (Ed.), pp. 1-288.

Spielberger, C.D., Gorsuch, R.L., Lushene, R., 1970. Manual for the State-Trait Anxiety Inventory. Consulting Psychologists Press, Palo Alto, CA.

Spitzer, R.L., Kroenke, K., Williams, J.B., 1999. Validation and utility of a self-report version of PRIME-MD: the PHQ primary care study. Primary Care Evaluation of Mental Disorders. Patient Health Questionnaire. JAMA 282, 1737-1744.

Tessier, S., Lambert, A., Scherzer, P., Jemel, B., Godbout, R., 2015. REM sleep and emotional face memory in typically-developing children and children with autism. Biol Psychol 110, 107-114.

TNS Opinion & Social, 2008. E-Communications Household Survey. Special Eurobarometer 293, Wave 68.2 (Nov-Dec 2007) - requested by the Directorate General for Health and Consumer Affairs of the European Commission.

TNS Opinion & Social, 2010. Electromagnetic Fields. Special Eurobarometer 347, Wave 73.3 (Mar-Apr 2010) - requested by the Directorate General for Health and Consumer Affairs of the European Commission.

Tomitsch, J., Dechant, E., 2015. Exposure to electromagnetic fields in households--trends from 2006 to 2012. Bioelectromagnetics 36, 77-85.

Wagner, U., Kashyap, N., Diekelmann, S., Born, J., 2007. The impact of post-learning sleep vs. wakefulness on recognition memory for faces with different facial expressions. Neurobiol Learn Mem 87, 679-687.

Walker, M.P., 2010. Sleep, memory and emotion. Prog Brain Res 185, 49-68.

Walker, M.P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J.A., Stickgold, R., 2002. Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning. Neuron 35, 205-211.

Watson, D., Clark, L.A., Tellegen, A., 1988. Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. J Pers Soc Psychol 54, 1063-1070.

Welch, P.D., 1961. A Direct Digital Method of Power Spectrum Estimation. Ibm Journal of Research and Development 5, 141-156.

Zentai, N., Csatho, A., Trunk, A., Fiocchi, S., Parazzini, M., Ravazzani, P., Thuroczy, G., Hernadi, I., 2015. No Effects of Acute Exposure to Wi-Fi Electromagnetic Fields on Spontaneous EEG Activity and Psychomotor Vigilance in Healthy Human Volunteers. Radiat Res 184, 568-577.

Zulley, J., 2002. Fragebogen einer Schlafambulanz, in: Füller, I. (Ed.), Wenn der Schlaf gestört ist. Stiftung Warentest, Berlin, pp. 154-166.

Onlinequellen:

DGSM (o. J. a). Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI) [Online]; Verfügbar auf: http://www.dgsm.de/downloads/fachinformationen/frageboegen/psqi.pdf [Zugriff: 14.04.2020]

DGSM (o. J. b). Zweiwöchiges Schlaftagebuch [Online]; Verfügbar auf: http://www.dgsm.de/downloads/fachinformationen/frageboegen/2wochen.pdf [Zugriff: 14.04.2020]

DGSM (o. J. c). Epworth Schläfrigkeitsskala (ESS) [Online]; Verfügbar auf: http://www.dgsm.de/downloads/fachinformationen/frageboegen/ess.pdf [Zugriff: 14.04.2020]

DGSM (o. J. d). Abend- und Morgenprotokolle [Online]; Verfügbar auf: http://www.dgsm.de/downloads/fachinformationen/frageboegen/protokol.pdf [Zugriff: 14.04.2020]

Universität Düsseldorf (o. J.). G*Power [Online]; Verfügbar auf: http://www.gpower.hhu.de/ [Zugriff: 14.04.2020]

XIII Abkürzungsverzeichnis

A1, A2	Elektrodenposition Auriculum links, rechts
AASM	American Academy of Sleep Medicine
Ab	Abend
Abb.	Abbildung
Ag/AgCl	Silber/Silberchlorid
AHI	Apnoe- Hypopnoe- Index
AN	Adaptationsnacht
ASF	Allgemeiner Schlaffragebogen
BL	Baselinenacht
C3, C4, Cz	Elektrodenposition zentral links, rechts, Mitte
cm	Zentimeter
DGSM	Deutsche Gesellschaft für Schlafmedizin und Schlafforschung
DST	Digit Span Test
EEG	Elektroencephalogram / Elektroenzephalogramm
EiRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (äquivalente isotrope Strahlungsleistung)
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Electromyogramm
EOG	Elektrooculogramm
ESS	Epworth Sleepiness Scale
EU	Europäische Union
F3, F7	Elektrodenposition frontal, linkszentral, linkslateral
F4, F8, Fz	Elektrodenposition frontal rechtszentral, rechtslateral, Mitte
Fp1, Fp2, Fpz	Elektrodenposition frontopolar links, rechts, Mitte
FRT	Face Recognition Task
FSM	Forschungsstiftung Strom und Mobilfunk
g	Gramm
GBB 24	Gießener Beschwerdebogen
GHz	Gigahertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GSM	Global System for Mobile Communications

h	hour(s) Stunde(n)
Hz	Hertz
Kap.	Kapitel
KDEF	Karolinska Directed Emotional Faces
kHz	Kilohertz
kΩ	Kilo Ohm
LABO	Landesamt für Bürger- und Ordnungsangelegenheiten
LPS	Leistungsprüfsystem
M.	Musculus
mm	Millimeter
MAB	Morgen- Abendtyp- Bestimmung
maxSAR10g	Maximalwert der über 10g zusammenhängendes Körpergewebe gemittelten Spezifischen Absorbtionsrate
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
MN	Messnacht
MP3	MPEG-1 Audio Layer 3
Mo	Morgen
ms	Millisekunden
mW/kg	Milliwatt pro Kilogramm
MWT	Mehrfachwahl-Wortschatz-Test
N bzw. n	Anzahl
N1, N2, N3	non-REM Schlafstadien
NA	negativer Affekt
Non-REM	Non Rapid Eye Movement
NREM	Non Rapid Eye Movement
O1, O2, Oz	Elektrodenposition okzipital links, rechts, Mitte
P3, P4, Pz	Elektrodenposition parietal links, rechts, Mitte
PA	positiver Affekt
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
PHQ-9	Patient Health Questionnaire für depressive Symptome
PHQ-15	Patient Health Questionnaire für somatische Symptome
PLMS	Periodic Leg Movements in sleep/ Periodische Beinbewegungen im Schlaf

PLMSAI	Index für Periodische Beinbewegungen im Schlaf mit Arousal
PSG	Polysomnografie
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index
REM	Rapid Eye Movement
RESP	Respiratory
RWT	Regensburger Wortflüssigkeitstest
s	Sekunde(n)
SAR	Spezifische Absorptionsrate / Spezific Absorption Rate
SAR10g	über 10 g zusammenhängendes Körpergewebe gemittelte Spezifische Absorptionsrate
SFTT	Sequential Finger Tapping Task
Sham	Scheinexposition
S0-tDCS	Slow oscillating transcranial Direct Current Stimulation / langsam oszillierende transkranielle Gleichstromstimulation
STAI	State- Trait- Angst Inventar / State- Trait Anxiety Inventory
T3, T5	Elektrodenposition temporal links anterior, links posterior
T4, T6	Elektrodenposition temporal rechts anterior, rechts posterior
Tab.	Tabelle
tDCS	Transcranial Direct Current Stimulation / transkranielle Gleichstromstimulation
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TNS	Taylor Nelson Sofres – Marktforschungsinstitut
U3	Untertest 3 des Leistungsprüfsystems
U4	Untertest 4 des Leistungsprüfsystems
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VAS	visuelle Analogskala / visual analogue scale
vgl	vergleiche
V/m	Volt pro Meter
W	Watt
WiFi	Kunstwort, das an HiFi (High Fidelity, hohe Wiedergabequalität) erinnert – als Warenzeichen für Standards "IEEE 802.11x" des IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
WLAN	Wireless Local Area Network
W/kg	Watt pro Kilogramm
WP	Wortpaare

WPT	Wortpaartest
z.B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem
µV	Mikrovolt
µT	Mikrotesla

XIV Abbildungsverzeichnis

Abb. IV.1: Studiendesign. 16

Abb. IV.2: Schematische Darstellung des Ablaufs der Screeningnacht (AN), der Baselinenächte (BL) sowie der Nächte mit Exposition (MN)..... 19

Abb. V.1: Tiefpassfilter für EEG-Polysomnographieeingänge des Registriergerätes. 22

Abb. V.2: Elektrodenkabel mit Induktivitätsbelag..... 23

Abb. V.3: Melone mit Kopf-Elektroden. 24

Abb. V.4: Powerspektren der Melonenaufzeichnung, Lokalisation T3..... 25

Abb. VII.1: Polysomnographische Screening-Untersuchung. 36

Abb. VII.2: Proband mit 19 nach dem 10-20-System positionierten Elektroden 37

Abb. VII.3: Exposition der schlafenden Probanden..... 37

Abb. VII.4: Diagramm zur Probandenrekrutierung. 40

Abb. VII.5: Besorgnis wegen verschiedener Umweltfaktoren. 42

Abb. VIII.1: Durchführung des Wortpaarassoziationstests (WPT). 51

Abb. VIII.2: Durchführung der Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung (FRT). 53

Abb. X.1: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition 60

Abb. X.2: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den in den Studiennächten mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten. 61

Abb. X.3: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT für die Dimensionen „Frische“ und „Wachheit“. 63

Abb. X.4: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition 64

Abb. X.5: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten. 64

Abb. X.6a: Vergleich der Ergebnisse zu der mittels des State-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. 66

Abb. X.6b: Ergebnisse der univariaten Auswertung von der mittels des State-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente. 66

Abb. X.7: Vergleich der Ergebnisse zu den mittels des Gießener Beschwerdefragebogens erfassten körperlichen Beschwerden zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. 67

Abb. X.8: Ergebnisse der univariaten Auswertung von den mittels des Gießener Beschwerdefragebogens erfassten körperlichen Beschwerden. 68

Abb. X.9: Vergleich der Ergebnisse zu den subjektiven Schlafparametern zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. 73

Abb. X.10: Visualisierung der Übereinstimmung hinsichtlich der Einschätzung der Erholsamkeit des Schlafes nach Wi-Fi und Sham-Expositionsbedingung. 74

Abb. X.11: Vergleich der Ergebnisse zu der Makrostruktur des Schlafs zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. 75

Abb. X.12: Darstellung der individuellen Hypnogramme in Form von Lasagne Plots. 80

Abb. X.13: Vergleich der Ergebnisse zu den Arousal im Schlafs zwischen der vorliegenden Studie und einer Studie zu Effekten einer TETRA-Exposition. 80

Abb. X.14: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts (a) des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln und (b) des Faktors EXPOSITIONSABFOLGE für die Powerspektralwerte im breiten Schlafspindelfrequenzbereich im Schlafstadium N2. 82

Abb. X.15: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für das Schlafstadium N1 (links) und das Schlafstadium N2 (rechts)..... 86

Abb. X.16: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für das Schlafstadium N3 (links) und das Schlafstadium REM (rechts)..... 86

Abb. X.17a: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors REGION für die Powerspektralwerte in den nach IPEG definierten Frequenzbereichen für den gesamten NREM-Schlaf. 87

Abb. X.17b: Globale EEG-Leistung (log-transformiert) im Alpha-Frequenzbereich während des NREM-Schlafs unter beiden Expositionsbedingungen. 87

Abb. X.18: Ergebnisse der univariaten Auswertung des Wortpaarassoziationstests. 94

Abb. X.19: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT und der Interaktion EXPOSITION*ZEIT für die Anzahl korrekt erinnerter Wortpaare. 96

Abb. X.20: Ergebnisse der univariaten Auswertung der sequenziellen Finger-Tapping Aufgabe. 97

Abb. X.21: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors ZEIT für die Anzahl korrekt wiedergegebener Sequenzen. 98

Abb. X.22: Ergebnisse der univariaten Auswertung der Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung. 99

Abb. X.23: Visualisierung des mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekts des Faktors ZEIT für die Memory Accuracy von allen Gesichtsausdrucken (links), neutralen Gesichtsausdrucken (Mitte) und positiven Gesichtsausdrucken (rechts). 100

Abb. X.24: Ergebnisse der univariaten Auswertung der Zahlenspannentests. 101

Abb. X.25: Ergebnisse der univariaten Auswertung des Regensburger Wortflüssigkeitstests. 102

Abb. X.26: Visualisierung der mittels einer ANOVA mit Messwiederholung festgestellten statistisch signifikanten Effekte des Faktors ZEIT für die Anzahl korrekt genannter Wörter bei der formal-lexikalischen Teilaufgabe (links) und der Interaktion der Faktoren EXPOSITION*ZEIT für die Anzahl korrekt genannter Wörter bei der semantisch-kategoriellen Teilaufgabe (rechts). 102

XV Tabellenverzeichnis

Tab. IV.1: Assessments während des Screenings, der Baseline- (BL) und Messnächte (MN). 18

Tab. IV.2: Gestaffelte Auszahlung der Aufwandsentschädigung. 19

Tab. VII.1: Fragebögen, die zum Screening eingesetzt wurden. 32

Tab. VII.2: Untersuchungen im Vorfeld der Studie (medizinische Untersuchungen). 35

Tab. VII.3: Einschlusskriterien für eine Studienteilnahme. 38

Tab. VII.4: Ausschlusskriterien für eine Studienteilnahme. 39

Tab. VII.5: Stichprobencharakteristika (n = 34) 41

Tab. VIII.1: Parameter zur Charakterisierung der subjektiven Schlafqualität 46

Tab. VIII.2: Objektive Parameter zur Charakterisierung der Makrostruktur des Schlafes. 47

Tab. VIII.3: Parameter zur Charakterisierung der Mikrostruktur des Schlafes. 49

Tab. VIII.4:: Zusammenstellung der Bilder für den emotionalen Gedächtnistest. 52

Tab. X.1: Deskriptive Statistiken für erhobene Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren getrennt nach Zeitpunkt der Datenerhebung (abends und morgens) sowie nach Exposition (Wi-Fi und Sham). 59

Tab. X.2: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den mittels Visueller Analogskalen erfassten Befindlichkeiten. 62

Tab. X.3: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den mittels der Positive and Negative Affect Schedule erfassten Affektkomponenten 65

Tab. X.4: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von der mittels des Stait-Trait-Angstinventars erfassten situativen Angstkomponente. 66

Tab. X.5: Deskriptive Statistiken und Vergleiche der Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs sowie der subjektiven Schlafqualität auf der Basis gepoolter Baseline- und Messnächte. 71

Tab. X.6a: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die subjektive Schlafqualität. 76

Tab. X.6b: Kreuztabelle zu den subjektiv erfassten Daten zur Erholsamkeit des Schlafs. 76

Tab. X.7: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs. 77

Tab. X.8: Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs während der 1. Nachthälfte. 78

Tab. X.9: Auswirkungen einer Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf die Ergebnisparameter zur Beschreibung der Makrostruktur des Schlafs während der 2. Nachthälfte. 79

Tab. X.10: Effekte einer die ganze Nacht andauernden Wi-Fi-Exposition im Vergleich zu Sham auf Arousalparameter. 83

Tab. X.11: Deskriptive Statistiken für den Frequenzbereich langsamer Oszillationen sowie für die beiden Schlafspindelfrequenzbereiche aufgeschlüsselt nach Schlafstadium, Region und Exposition (Wi-Fi und Sham). 83

Tab. X.12: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den Powerspektralwerten in den Frequenzbereichen von langsamen Oszillationen und Schlafspindeln. 85

Tab. X.13: Deskriptive Statistiken für den Delta-, Theta-, Alpha-, Beta1- und Beta2-Frequenzbereich aufgeschlüsselt nach Schlafstadium, Region und Exposition (Wi-Fi und Sham). 88

Tab. X.14: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den Powerspektralwerten für den Delta-, Theta-, Alpha-, Beta1- und Beta2-Frequenzbereich 92

Tab. X.15: Deskriptive Statistiken zu den Ergebnisparametern aus den in der Studie durchgeführten Gedächtnistests. 95

Tab. X.16: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der im Wortpaarassoziationstest untersuchten deklarativen Gedächtnisleistung. 96

Tab. X.17: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der in der sequenziellen Finger-Tapping Aufgabe untersuchten prozeduralen Gedächtnisleistung. 97

Tab. X.18: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung der in Aufgabe zur Gesichtswiedererkennung untersuchten emotionalen Gedächtnisleistung. 99

Tab. X.19: Deskriptive Statistiken zu den Ergebnisparametern aus den in der Studie durchgeführten Kontrolltests. 103

Tab. X.20: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den korrekt erinnerten Zahlenreihenfolgen. 104

Tab. X.21: Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung von den korrekt wiedergegebenen Sequenzen. 104