

**AUSWIRKUNGEN HOCHFREQUENTER ELEKTROMAGNETISCHER FELDER
AUF DEN MENSCHEN: ERGEBNISSE AUS EINER EXPERIMENTELLEN
HUMANSTUDIE ZUM TETRA-FUNK**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

eingereicht im Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Dipl. Biol. Torsten Eggert

aus Bremen

2016

Die Arbeit wurde im Zeitraum von Januar 2010 bis März 2016 (Projektlaufzeit: 01.10.2009 bis zum 30.09.2013) im Kompetenzzentrum für Schlafmedizin des Universitätsklinikums der Berliner Charité, Hindenburgdamm 30, 12200 Berlin unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe angefertigt.

1. Gutachterin: Frau Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe
2. Gutachterin: Frau Prof. Dr. Ursula Koch

Tag der Disputation: 12.07.2016

INHALTSVERZEICHNIS

I.	Abkürzungsverzeichnis	5
II.	Zusammenfassung	7
III.	Summary	9
1.	Einleitung	11
1.1.	Grundlagen	11
1.2.	Zielsetzung	18
2.	Die Einzelleistungen	20
2.1.	Studie zur Überprüfung der Wärmewahrnehmung	20
2.1.1.	Kurze Zusammenfassung der Studie	20
2.1.2.	Geleisteter Eigenanteil an dieser Einzelleistung	21
2.1.3.	Publikation: <i>Experimental Investigation of Possible Warmth Perception from a Head Exposure System for Human Provocation Studies with TETRA Handset-like Signals</i>	22
2.2.	Teiluntersuchung zur Überprüfung eines Einflusses von TETRA-Endgerätsignalen auf langsame Hirnpotentiale	30
2.2.1.	Kurze Zusammenfassung der Studie	30
2.2.2.	Geleisteter Eigenanteil an dieser Publikation	32
2.2.3.	Publikation: <i>Terrestrial Trunked Radio (TETRA) exposure and its impact on slow cortical potentials</i>	33
2.3.	Teiluntersuchung zur Überprüfung eines Einflusses von TETRA-Endgerätsignalen auf kognitive Leistungen und das subjektive Wohlbefinden	45
2.3.1.	Kurze Zusammenfassung der Studie	45
2.3.2.	Geleisteter Eigenanteil an dieser Publikation	46
2.3.3.	Publikation: <i>Do signals of a hand-held TETRA transmitter affect cognitive performance, well-being, mood or somatic complaints in healthy young men? Results of a randomized double-blind cross-over provocation study</i>	47
3.	Diskussion	58
3.1.	Thermische Auswirkungen von HF-EMF	58
3.2.	Auswirkungen gepulster HF-EMF	62
3.3.	Methodische Stärken und Schwächen	67

4.	Schlussfolgerung	70
5.	Literaturverzeichnis	71
6.	Anhang	76
6.1.	Danksagung	76
6.2.	Curriculum vitae	77
6.3.	Weitere Publikationen	78
6.3.1.	Themenverwandte Veröffentlichungen	78
6.3.2.	Veröffentlichung zu anderen Themenbereichen	78
6.4.	Eidesstattliche Erklärung	79

I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AGNIR	<i>Advisory Group on Non-Ionising Radiation</i>
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BDBOS	Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BP	Bereitschaftspotential (<i>readiness potential</i>)
CNV	<i>Contingent negative variation</i>
DMF	Deutsches Mobilforschungsprogramm
EEG	Elektroenzephalogramm
EMF	elektromagnetische Felder
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HF	Hochfrequenz
HF-EMF	hochfrequente elektromagnetische Felder
ICNIRP	Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>)
IEGMP	<i>Independent Expert Group on Mobile Phones</i>
IF	Impactfaktor
Infas	Institut für angewandte Sozialwissenschaft
LP	langsames Hirnpotential (<i>slow cortical potential</i>)
SAR	spezifische Absorptionsrate
SCENIHR	<i>Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks</i>

SSK	Strahlenschutzkommission
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
VMT	<i>Visual Monitoring Task</i>
ZNS	zentrales Nervensystem

II. ZUSAMMENFASSUNG

Die Vorstellung, dass von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) der viel benutzten Kommunikationstechniken eine mögliche Gefahr für die menschliche Gesundheit ausgehen könnte, hat sich in den letzten Jahren zu einem hochbrisanten gesellschaftlichen Diskussionsthema entwickelt. In einigen Humanstudien konnte gezeigt werden, dass auch unter Expositionen unterhalb der zum Schutz von Personen vor einer HF-EMF-Befeldung festgelegten Grenzwerte biologische Effekte auf das zentrale Nervensystem (ZNS) beobachtet werden. Aus Mobilfunkstudien ist beispielsweise bekannt, dass sich derartige Expositionseffekte in geringfügigen Modifikationen der Hirnaktivität äußern können, die in der Regel jedoch nicht mit einem veränderten Verhalten einhergehen. Eine Bewertung dieser Ergebnisse von unabhängigen wissenschaftlichen Expertengruppen ergab, dass aktuell bei Einhaltung der Grenzwerte keine Hinweise für eine Gesundheitsbeeinträchtigung durch HF-EMF vorliegen.

Um den Wissensstand zu möglichen Auswirkungen von HF-EMF auf den Menschen zu erweitern, wurden in der hier vorliegenden kumulativen Promotionsschrift Teilergebnisse aus einem Forschungsprojekt zum Einfluss von Endgerätsignalen des Terrestrial Trunked Radio (TETRA)-Standards auf kognitive Funktionen herangezogen. TETRA ist ein moderner digitaler Funkstandard, der überwiegend von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben verwendet wird. Die Teilergebnisse umfassen die Auswirkungen einer TETRA-Exposition auf langsame Hirnpotentiale (LP) sowie auf Verhaltensparameter bei verschiedenen Tests und auf das subjektive Wohlbefinden. Zur Abschätzung des Entblindungsrisikos im Zusammenhang mit einer möglichen subjektiven Wärmewahrnehmung infolge einer TETRA-Exposition wurde noch vor Beginn der Datenerhebung im Forschungsprojekt eine Untersuchung durchgeführt, deren Ergebnisse hier ebenfalls berücksichtigt sind.

Die Vorstudie zur Wärmewahrnehmung ergab, dass eine TETRA-Exposition mit einem SAR-Wert von 6 W/kg zu einer statistisch signifikanten, über zwei Messpunkte gemittelten, oberflächlichen Temperaturerhöhung von max. 0,8 °C in der Nähe des Expositionsortes führt. Diese Erwärmung wurde von den Probanden jedoch nicht wahrgenommen. Somit war die Verblindung im TETRA-Forschungsprojekt nicht gefährdet. Im Hinblick auf mögliche Auswirkungen von TETRA-Endgerätsignalen auf das ZNS zeigte sich, dass die TETRA-Exposition weder einen Einfluss auf die Amplitude der untersuchten LP noch auf die mit diesen Aufgaben assoziierten Testleistungen hatte. Eine TETRA-Exposition während der Durchführung eines Arbeitsgedächtnis- und verschiedenen Aufmerksamkeitstests hatte sporadische, teils inkonsistente Effekte auf die untersuchten Verhaltensparameter zur Folge. Ein

unter Exposition beobachteter Einfluss auf das subjektive Wohlbefinden sowie auf körperliche Symptome wurde ebenfalls nicht festgestellt.

Unter der Voraussetzung, dass die aktuell geltenden Grenzwerte zum Schutz von Personen vor einer HF-EMF-Befeldung eingehalten werden, liefern die Ergebnisse insgesamt keine Evidenz für eine gesundheitsschädigende Wirkung von HF-EMF drahtloser Kommunikationstechniken. Aus den Ergebnissen der Vorstudie zur Wärmewahrnehmung wurde geschlossen, dass auch bei Expositionen, die zu einer relativ hohen Erwärmung der Haut führen, eine doppelblinde Versuchsdurchführung möglich ist.

III. SUMMARY

The idea that radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) emitted by widely used wireless communication systems are possibly hazardous to human health has led to a highly controversial public debate in the last few years. Some human studies have shown that exposure to RF-EMF may induce biological effects on the central nervous system (CNS) even under conditions below the recommended safety limits. For example, mobile phone studies revealed slight RF-EMF-related modifications of brain activity, which are, however, not generally accompanied by a change in behavior. Reviews of the scientific literature by several independent expert groups have consistently come to the conclusion that there is currently no evidence for relevant health effects resulting from RF-EMF exposure.

In the present cumulative doctoral thesis partial results of a comprehensive research project about acute effects of RF-EMF emitted by Terrestrial Trunked Radio (TETRA) handheld devices on cognitive functions were considered to extend the current state of knowledge about possible effects of RF-EMF on humans. TETRA is a modern digital mobile radio standard for occupational communication of security authorities and organizations. The partial results refer to possible impacts on slow cortical potentials (SCP) as well as on cognitive performance and well-being. Prior to the data collection period of the TETRA research project, a pilot study was performed in order to estimate the risk of unblinding due to possible subjective warmth perception caused by TETRA exposure. The results of this study have also been considered for the present thesis.

The pilot study showed that the high TETRA exposure level of 6 W/kg caused a statistically significant average skin temperature increase measured at two locations of max. 0.8 °C close to the exposure site. However, since skin temperature rises were not perceived by the subjects, blinding of the TETRA research project was not compromised. With regard to possible acute effects of RF-EMF on the CNS, a significant TETRA exposure impact was neither observed on the amplitudes of the investigated SCP nor on the associated behavioral measures. A TETRA exposure applied during the completion of a working memory task and of tests on different aspects of attention yielded sporadic, partly inconsistent effects on the investigated behavioral measures. Subjective well-being and somatic complaints were also not affected by TETRA exposure.

The results of the here presented studies reveal no evidence for any health-related effects of RF-EMF exposure from wireless communication systems provided that the currently valid exposure guidelines for the protection of people against RF-EMF are followed. It was con-

cluded from the results of the pilot study that double-blinding is ensured even under exposure intensities leading to relatively high skin temperature rises.

1. EINLEITUNG

1.1. GRUNDLAGEN

Mit Einführung der Funktelegraphie in den Jahren um 1900 konnten erstmalig Informationen drahtlos mittels elektromagnetischer Felder (EMF) über größere Entfernungen versendet werden. Seitdem hat sich die Funktechnik stetig weiterentwickelt und ist heutzutage in Form des Rund-, Hör- oder Mobilfunks kaum mehr aus dem Alltag der Menschen wegzudenken. Der funktechnisch genutzte Teil des elektromagnetischen Spektrums umfasst den hochfrequenten (HF) Bereich der nichtionisierenden Strahlung von 100 kHz bis 300 GHz.

Der Bereich um 1 GHz ist dabei überwiegend für die drahtlosen Kommunikationssysteme vorgesehen (Veyret und Perrin, 2012). Dazu zählen u.a. der Mobilfunk, die schnurlose DECT-Telefonie, Bluetooth sowie der digitale Behördenfunk. Grundsätzlich sind sich diese Systeme sehr ähnlich, es bestehen aber Unterschiede in der jeweiligen verwendeten Signalcharakteristik. In Deutschland sind die folgenden zu Kommunikationszwecke zur Verfügung stehenden Frequenzbänder von wissenschaftlichem Interesse: 890 bis 915 MHz und 935 bis 960 MHz des Global System for Mobile Communications (GSM)-Standards 900 (D-Netz), 1710 bis 1785 MHz und 1805 bis 1880 MHz des GSM-Standards 1800 (E-Netz), 1920 bis 1980 MHz und 2110 bis 2170 MHz des Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)-Standards sowie 380 bis 400 MHz und 410 bis 450 MHz des Terrestrial Trunked Radio (TETRA)-Standards. Beim GSM- und TETRA-Standard wird das hochfrequente Trägersignal nicht kontinuierlich, sondern in Pulsen gesendet, woraus zusätzliche niederfrequente Anteile resultieren. Der UMTS-Standard verwendet hingegen zum Übermitteln der Informationen überwiegend ein ungepulstes Signal.

Dass die mobile Kommunikation fester Bestandteil des täglichen Lebens geworden ist, lässt sich z.B. an der in Deutschland jährlich anwachsenden Anzahl der Mobilfunkanschlüsse festmachen. Obwohl es bereits 2006 statistisch gesehen in etwa so viele Anschlüsse wie Einwohner gab, ist diese Anzahl bis 2014 noch einmal auf 1,4 Anschlüsse pro Einwohner gestiegen (BnetzA, 2015). Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass in vielen Haushalten zusätzlich schnurlose Festnetzanschlüsse existieren, kabellos das Internet genutzt wird und zur Überwachung des Schlafes von kleinen Kindern ein Babyfon im Einsatz ist. Diese Omnipräsenz hochfrequenter (HF)-EMF-Quellen und die daraus resultierende mangelnde Möglichkeit, diesen Feldern auszuweichen, hat aber auch in Teilen der breiten Öffentlichkeit zu kontroversen Diskussionen hinsichtlich möglicher Gesundheitsgefährdungen und/oder subjektiv empfundener Betroffenheit durch diese Technologien geführt. Zur Ermittlung dieser Befürchtungen und Ängste hat *TNS Opinion & Social Network* im Auftrag der

Europäischen Kommission im Jahr 2010 Interviews mit über 26.000 Personen zum Thema EMF geführt. Dabei stellte sich heraus, dass sich etwa 46 % der Befragten EU-Bürgerinnen und -Bürgern wegen möglicher Gesundheitsrisiken durch EMF-Quellen besorgt zeigten. Bei näherer Betrachtung der Umfragewerte auf Länderebene offenbarten sich große Unterschiede zwischen den Mitgliedsstaaten. Während in Griechenland, Italien und Zypern etwa 80 % der Befragten Besorgnisse gegenüber EMF-Quellen äußerten, waren es in Lettland, Schweden und Dänemark nur etwa 20 %. In Deutschland betrug der Anteil besorgter Bürger 29 % (EC, 2010). Mit besonderem Bezug auf den Mobilfunk hat das Institut für angewandte Sozialwissenschaft (Infas) im Rahmen des Deutschen Mobilforschungsprogramm (DMF), welches vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) umgesetzt und koordiniert wurde, in den Jahren 2003 bis 2006 sowie im Jahr 2009 bundesweit sehr ähnliche Telefonbefragungen bei über 12,000 Bürgerinnen und Bürger ab 14 Jahren durchgeführt (Infas, 2004; Infas, 2005a; Infas, 2005b; Infas, 2006; Infas, 2009). Zusammengefasst konnte bei diesen Umfragen beobachtet werden, dass sich ein über die Jahre hinweg nahezu gleichbleibender Anteil der Bevölkerung im Hinblick auf HF-EMF des Mobilfunks als besorgt (ca. 30 %) oder als gesundheitlich beeinträchtigt (ca. 10 %) beschrieben hatte. Im Jahr 2013 wurde diese Umfrage an weiteren 2,500 Personen erneut durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich das Meinungsbild in der Zwischenzeit zu diesem Thema verändert hatte (LINK, 2013). Auch in dieser Umfrage konnten die Beobachtungen aus den vorherigen Befragungen bezüglich der Besorgnis durch HF-EMF des Mobilfunks bestätigt werden (ca. 30 %). Der Anteil der Bevölkerung, der sich durch HF-EMF des Mobilfunks gesundheitlich beeinträchtigt fühlte, ist 2013 im Vergleich zu den Vorjahren hingegen leicht auf 7 % gesunken. In offenen Fragen, in denen die gesundheitlichen Beeinträchtigungen konkretisiert werden sollten, wurden Kopfschmerzen (16 %) gefolgt von Schlafproblemen (12 %) am häufigsten genannt. Im Vergleich zu einer Reihe weiterer potentieller Umwelt- und Gesundheitsbelastungen nahm die Besorgnis wegen HF-EMF des Mobilfunks aber eher eine untergeordnete Stellung ein. Aus der beobachteten Konstanz der Befragungsergebnisse wurde geschlussfolgert, dass das Thema Mobilfunk und die damit verbundenen Ängste und Sorgen in der Gesellschaft weiterhin von großer Relevanz sind (LINK, 2013).

Werden mögliche biologische Auswirkungen durch eine HF-Befeldung thematisiert, müssen zuallererst die thermischen Effekte genannt werden. Sie stellen den physikalischen Hauptwirkmechanismus von HF-EMF dar, der als wissenschaftlich gesichert gilt. Unter einem thermischen Effekt wird eine lokale Temperaturerhöhung verstanden, die aus einer Absorption der HF-EMF im betroffenen Gewebe resultiert (LUBW/LfU, 2010). Um gesundheitlich bedeutende Beeinträchtigungen durch eine zu starke Erwärmung des Gewebes zu vermeiden, wurde im Sinne der Risikoabschätzung festgelegt, dass Ganzkörpertemperaturer-

höhungen infolge einer HF-Befeldung von bis zu 1 °C als noch akzeptabel angesehen werden können, da sie im Bereich der natürlich vorkommenden Temperaturschwankungen liegen (UNEP/WHO/IRPA, 1993). Auf dieser Grundlage hat die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, ICNIRP) im Jahr 1998 Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300 GHz) veröffentlicht (ICNIRP, 1998). Die Richtwerte beziehen sich auf die spezifische Absorptionsrate (SAR), die angibt, welche Leistung pro Kilogramm Körpergewebe (W/kg) absorbiert wird (BMU, 2012). Ausgehend von einem Ganzkörper-SAR-Schwellenwert von 4 W/kg, bei dem die Wirkschwelle von etwa 1 °C vermutet wurde, hat die ICNIRP um ein 10-faches kleinere Ganzkörper-SAR-Grenzwerte für beruflich exponierte Personen (0,4 W/kg) und um ein 50-faches kleinere Ganzkörper-SAR-Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (0,08 W/kg) empfohlen. Für eine lokale Exposition von Kopf und Rumpf (gemittelt über 10 g Gewebe) wurde bei beruflich bedingter Exposition ein SAR-Grenzwert von 10 W/kg und bei einer Exposition der Allgemeinbevölkerung ein SAR-Grenzwert von 2 W/kg vorgeschlagen (ICNIRP, 1998). Diese Grenzwertempfehlungen sind bei der Verabschiedung der in Deutschland aktuell gültigen 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, die u.a. die Einhaltung der Anforderungen zum Schutz von Personen am Arbeitsplatz und der Allgemeinbevölkerung vor einer HF-Befeldung gesetzlich regelt, berücksichtigt worden.

Kontrovers diskutiert werden dagegen mögliche biologische Auswirkungen durch eine HF-Befeldung, die nicht mit einer Erwärmung erklärt werden können (BMU, 2012). Dazu zählen auch biologische Effekte, die das zentrale Nervensystem (ZNS) betreffen können. Dieser Aspekt betrifft insbesondere die Funktechniken, die für Kommunikationszwecke genutzt werden, da deren Endgeräte in der Regel beim Sprechen in der Nähe des Kopfes gehalten werden. In diesem Zusammenhang wurden Vermutungen aufgestellt, dass die Signalcharakteristiken der drahtlosen Kommunikationssysteme mit ihren niederfrequenten Modulationskomponenten direkt auf Neurone einwirken können und über diesen Weg zu Veränderungen der Hirnaktivität führen (Gollnick et al., 2009). Zur Klärung dieses Sachverhalts wurde in den vergangenen Jahren eine Reihe experimenteller Studien zur Überprüfung möglicher biologischer Auswirkungen von HF-EMF auf die Gehirnaktivität im Schlaf und im Wachzustand bei unterschiedlicher kognitiver Beanspruchung unter Einbeziehung der assoziierten Testleistungen durchgeführt. In der Mehrzahl dieser Studien wurde dabei der Einfluss von Mobilfunksignalen untersucht. In Deutschland wurden derartige Forschungsprojekte von der Forschungsgemeinschaft Funk und im Rahmen des bereits erwähnten DMF vergeben. Ausführliche Zusammenfassungen dieser Studien sowie deren Bewertung im Sinne des Strahlenschutzes sind z.B. von der Strahlenschutzkommission (SSK), von der *Advisory Group on*

Non-Ionising Radiation (AGNIR) und von dem *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* (SCENIHR) publiziert worden (AGNIR, 2012; SCENIHR, 2015; SSK, 2011).

Die Literaturlauswertungen dieser Expertengruppen ergaben ziemlich übereinstimmend, dass die Frage, ob eine HF-Befeldung eine gesundheitsbeeinträchtigung Beeinflussung des ZNS zur Folge haben kann, wegen der sehr inkonsistenten Datenlage weiterhin nicht abschließend beantwortet werden kann. Während in manchen der experimentellen Laboruntersuchungen kein Einfluss einer Exposition mit einem Mobilfunksignal auf das Elektroenzephalogramm (EEG) im Schlaf- und im Wachzustand sowie auf die Leistungsfähigkeit beobachtet werden konnte, hatten andere wiederum gezeigt, dass eine entsprechende Exposition mit leichten Veränderungen auf der physiologischen und der Verhaltensebene einhergehen kann. Am konsistentesten sind dabei die unter Exposition beobachteten Effekte auf die Alpha-Power im spontanen Ruhe-EEG (z.B. Croft et al., 2010; SCENIHR, 2015; Vecchio et al., 2010; Vecchio et al., 2012) und auf die EEG-Power im NREM-Schlaf, wobei hier die betroffenen Frequenzbänder, Schlafstadien und Zeitfenster stark variieren können (z.B. Borbely et al., 1999; Huber et al., 2000; Loughran et al., 2012; Lowden et al., 2011; Regel et al., 2007b; SCENIHR, 2015; Schmid et al., 2012b). Abzuklären sind allerdings noch der dieser Beeinflussung der Hirnaktivität zugrundeliegende Wirkmechanismus sowie die gesundheitliche Relevanz der leichten physiologischen Effekte. Bisher liegen bei Einhaltung der Grenzwerte keine Hinweise für eine Gesundheitsbeeinträchtigung vor (AGNIR, 2012; SCENIHR, 2015; SSK, 2011). Als Gründe für die inkonsistenten Ergebnisse werden u.a. die unterschiedlichen verwendeten Expositionsverfahren, die große Anzahl der untersuchten Ergebnisparameter, der Mangel an Replikationsstudien sowie Unterschiede in den statistischen Herangehensweisen diskutiert (SCENIHR, 2015). Des Weiteren wurde bei der Bewertung festgestellt, dass in einigen Studien keine Kontrollbedingungen berücksichtigt wurden, eine unzureichende Verblindungsart verwendet wurde oder die Größe der Probandengruppe zu klein war, um belastbare Aussagen zu treffen (AGNIR, 2012). Gerade Letzteres ist von großer Bedeutung, da die bisher gefundenen Ergebnisse eher schwächer ausgeprägte Effektgrößen vermuten lassen und somit eine entsprechend große Anzahl an Probanden untersucht werden muss, um diese Effekte in konfirmatorischen Studien mit entsprechender Power replizieren zu können. Aufgrund der Tatsache, dass es immer noch zu wenig methodisch belastbare Studien auf diesem Gebiet gibt, wurde weiterer Forschungsbedarf als notwendig angesehen, um die möglichen Ursachen dieser beobachteten Effekte aufklären zu können (AGNIR, 2012; SCENIHR, 2015; SSK, 2011). Zu einer ähnlichen Einschätzung gelangte auch die *World Health Organisation*, die in ihrer Wissenschaftsagenda zu HF-EMF die

Durchführung weiterer Human-Provokationsstudien im Sinne der Aufklärung dieser Effekte empfohlen hatte (WHO, 2010).

Im Rahmen des DMF wurden im Kompetenzzentrum für Schlafmedizin der Berliner Charité (Leitung: Frau Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe) zu diesem Themenkomplex zwei große Forschungsprojekte durchgeführt. In einer experimentellen Feldstudie (*„Untersuchung der Schlafqualität bei Anwohnern einer Basisstation – Experimentelle Studie zur Objektivierung möglicher psychologischer und physiologischer Effekte unter häuslichen Bedingungen“*; Förder-Nr. FM 8837) wurde unter häuslichen Bedingungen der Einfluss einer Mobilfunkbasisstation auf die objektive und subjektive Schlafqualität an einer für die Gesamtbevölkerung repräsentativen Probandengruppe untersucht. Es zeigte sich, dass EMF von Basisstationen keinen Einfluss auf die Schlafqualität haben, sondern hier der Einfluss der Besorgnis über mögliche gesundheitliche Konsequenzen überwiegt. Die Ergebnisse sind in Form einer wissenschaftlichen Dokumentation mit peer-review Verfahren publiziert worden (Danker-Hopfe et al., 2010) und sind als Abschlussbericht auf der Homepage des BfS unter der Rubrik „Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm“ abrufbar (Danker-Hopfe und Dorn, 2008). In der anderen Studie (*„Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen“*; Förder-Nr. M8808) wurden im Labor 30 junge Männer zwischen 18 und 30 Jahren während des Nachtschlafes sowie während der Durchführung von Leistungstests am Vor- und Nachmittag mit HF-EMF, wie sie von Mobiltelefonen des GSM- und UMTS-Standards ausgehen, exponiert. In dieser Studie wurden physiologische Einflüsse der Exposition auf die Gehirnaktivität festgestellt, aber kein Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit, Schlafqualität und das Wohlbefinden. Bei den Testleistungen zeigte sich aber ein deutlicher Tageszeiteffekt, mit besseren Ergebnissen am Nachmittag. In Form eines Abschlussberichtes sind die Ergebnisse ebenfalls auf der Homepage des BfS unter der Rubrik „Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm“ abrufbar (Danker-Hopfe und Dorn, 2007). In internationalen Fachzeitschriften sind bisher die Ergebnisse zur Makrostruktur des Schlafes auf der Gruppenebene (Danker-Hopfe et al., 2011) sowie unter Berücksichtigung der individuellen Variabilität (Danker-Hopfe et al., 2016) und die Ergebnisse zu den kognitiven Funktionen (Sauter et al., 2011) veröffentlicht worden. In letztgenannter Arbeit wird auf die Bedeutsamkeit der Kontrolle des Tageszeitpunkts eingegangen.

Zur Überprüfung, ob die von einem TETRA-Endgerät abgestrahlten HF-Signale das ZNS beeinflussen können, wurde im Kompetenzzentrum für Schlafmedizin im Zeitraum vom 01.10.2009 bis zum 30.09.2013 ein weiteres umfangreiches Forschungsvorhaben durchgeführt (*„Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen“*; Förder-Nr. FM 8846). In einer Verwaltungsvereinba-

zung zwischen dem BfS und der Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) wurde beschlossen, dass die BDBOS die Durchführung dieses Forschungsvorhabens im Rahmen einer Risikobewertung von Feldern des TETRA-Funkstandards finanziert. Der TETRA-Funkstandard ist ein vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (*European Telecommunications Standards Institute, ETSI*) entwickeltes digitales Bündelfunksystem der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), zu denen alle Einrichtungen, deren Auftrag die innere Gefahrenabwehr ist (z.B. Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienst und Katastrophenschutz), zählen. Er ermöglicht u.a. eine behördenübergreifende Kommunikation in Einzel- oder Gruppengesprächen, weist eine verbesserte Empfangs- und Sprachqualität im Vergleich zum Analogfunk auf und ist zudem durch Verschlüsselung abhörsicher (Linde, 2008). In Deutschland operiert der BOS-Funk im Bereich zwischen 380 MHz und 400 MHz. Um die knappen Frequenzressourcen effizienter nutzen zu können, kann beim TETRA-Standard ein Frequenzabschnitt (=Funkkanal) über ein Zeitmultiplexverfahren (*Time Division Multiple Access, TDMA*) von mehreren Anwendern gleichzeitig verwendet werden. Pro Funkkanal stehen vier Zeitschlitzte zur Verfügung, die jeweils eine Dauer von 14,167 ms aufweisen. Alle vier Zeitschlitzte zusammen bilden einen Rahmen mit einer Länge von 56,67 ms. Für den Fall, dass nur ein Zeitschlitz im Gesprächsmodus benötigt wird, erfolgt die Übertragung mit einem Tastverhältnis (*duty cycle*) von 25 % (14,167 ms / 56,67 ms) und das Trägersignal weist eine gepulste niederfrequente Amplitudenmodulation von 17,6 Hz (1000 ms / 56,67 ms) auf (im Vergleich dazu stehen beim GSM-Standard pro Funkkanal acht Zeitschlitzte zur Verfügung, woraus eine Pulsung von 217 Hz resultiert) (AGNIR, 2001).

Das TETRA-Forschungsprojekt, das bei ClinicalTrials.gov registriert (NCT01117597) ist, beabsichtigte, den Einfluss einer Exposition mit simulierten HF-Signalen auf die Gehirnaktivität im Schlaf und im Wachzustand sowie auf kognitive Funktionen bei jungen gesunden Männern zu überprüfen. Die Hirnaktivität im Wachzustand wurde während einer Ruhephase (Ruhe-EEG) und bei der Durchführung von validierten Tests zur Überprüfung der kognitiven Leistung erfasst. Die gesundheitliche Relevanz der Ergebnisse war im Sinne des Strahlenschutzes zu bewerten. Die Studienplanung sah dabei vor, die Provokation neben einer Sham-Bedingung bei zwei unterschiedlich hohen Expositionsstufen durchzuführen (TETRA 1,5 W/kg und TETRA 6 W/kg). Die niedrigere der beiden Expositionsstufen simulierte eine Nutzung unter Worst-Case-Bedingungen, während die höhere ein Expositionsszenario darstellte, dass so im normalen alltäglichen Sendebetrieb nicht vorkommt, den aktuell gültigen lokalen SAR-Grenzwert für beruflich Exponierte aber nicht überschreitet (Schmid et al., 2012a). Als Kooperationspartner hatten an dem Forschungsvorhaben die IMST GmbH (47475 Kamp-Lintfort), die für die Entwicklung und Betreuung der Expositionsanlage zustän-

dig war, und die Firma Seibersdorf Laboratories (2444 Seibersdorf, Österreich), die die dosimetrische Charakterisierung der Expositionsanlage übernahm, mitgewirkt. Des Weiteren wurde der Siesta Group Schlafanalyse GmbH (1210 Wien, Österreich) die Auswertung der in diesem Forschungsprojekt aufgezeichneten Polysomnographien übertragen. Der Abschlussbericht des TETRA-Forschungsprojektes ist auf der Homepage des BfS abrufbar (Danker-Hopfe et al., 2014). Da in dem TETRA-Forschungsprojekt auch eine Expositionsbedingung mit einem stärkeren TETRA-Signal vorgesehen war (TETRA 6 W/kg), welches in unmittelbarer Nähe zum Expositionsort zu messbaren Temperaturerhöhungen führen kann, wurde zur Abschätzung des Entblindungsrisikos noch vor Beginn der Datenerhebung eine Vorstudie zur Wärmewahrnehmung durchgeführt. Der Ergebnisbericht dieser Untersuchung ist von Sauter et al. (2010) verfasst worden.

1.2. ZIELSETZUNG

Wie in dem vorangegangenen Kapitel verdeutlicht wurde, werden aktuell HF-EMF des Mobilfunks bzw. der Kommunikationsfunktechniken allgemein von einem nicht unerheblichen Teil der Bevölkerung als besorgniserregend oder sogar gesundheitsbeeinträchtigend angesehen. Ebenso wurde erwähnt, dass in einigen wenigen Studien biologische Effekte auf das EEG auch bei Intensitäten unterhalb der von der ICNIRP empfohlenen Grenzwerte (ICNIRP, 1998) beobachtet werden konnten. Da es jedoch weiterhin an einem wissenschaftlich anerkannten Wirkmechanismus mangelt, mit dem diese Beobachtungen erklärt werden können, ist eine abschließende Bewertung dieser Befunde besonders unter dem Aspekt einer möglichen Gesundheitsgefährdung zurzeit nicht möglich. Deshalb sind zusätzliche, dem wissenschaftlichen Standard entsprechende Studien, die weiter zur Aufklärung dieser Frage beitragen, von zentraler Bedeutung für die EMF-Forschung.

Die hier vorliegende kumulative Promotionsschrift soll dazu einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie die aktuelle Datenlage zu möglichen akuten Auswirkungen von HF-EMF auf den Menschen qualitativ erweitert. Dafür wurden Teilergebnisse aus einer experimentellen Humanstudie zum TETRA-Funk herangezogen. Die Arbeit setzt sich aus drei Einzelleistungen zusammen, die im Rahmen dieses TETRA-Forschungsprojekts erbracht wurden: Die Überprüfung eines Einflusses von TETRA-Endgerätsignalen auf kognitive Leistungen auf der (1) elektrophysiologischen Ebene und auf der (2) Verhaltensebene, sowie die (3) Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung der aus diesem Expositionsprotokoll verursachten Erwärmung. Die ersten beiden Teiluntersuchungen beziehen sich jeweils auf elektrophysiologische und/oder behaviorale Daten, die während psychophysiologischer Tests am Tage erhoben wurden.

Die ersten beiden Teiluntersuchungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Wesentlichen die wissenschaftlichen Gütekriterien erfüllen, die für die Durchführung von Provokationsstudien zur Überprüfung eines Einflusses von HF-EMF auf kognitive Leistungen vorgeschlagen wurden (Regel und Achermann, 2011). So wurde bei ihnen neben dem hochwertigen Studiendesign (randomisiertes, doppelblindes, placebokontrolliertes cross-over Design) und einer belastbaren Methodik auch eine Stichprobengröße von 30 Teilnehmern berücksichtigt, die erforderlich ist, um einen Effekt mittlerer Größe bei einem cross-over Design mit einem t-Test für gepaarte Stichproben mit einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,05$ und einer statistischen Power von 0,8 absichern zu können (SCENIHR, 2015). Die Einschränkung hinsichtlich des Lebensalters (18-30 Jahre) führte zusätzlich dazu, dass mögliche altersbedingte Varianzen von EEG- und Leistungsparametern minimiert werden konnten. Dem Tageszeitpunkt der Testdurchführung als weiterer möglicher expositionsunabhän-

giger Einflussfaktor (Sauter et al., 2011) wurde ebenfalls Rechnung getragen. Des Weiteren ist in den beiden Teiluntersuchungen darauf geachtet worden, dass die für EMF-Studien empfohlenen Standards zum Expositionsaufbau (Kuster et al., 2004) grundsätzlich eingehalten wurden. In diesem Zusammenhang wurde besonders die dosimetrische Analyse für das TETRA-Forschungsprojekt (Schmid et al., 2012a) als beispielhaft hervorgehoben (SCENIHR, 2015).

Die Studie zur Wärmewahrnehmung war Teil des TETRA-Forschungsprojektes, wurde aber zeitlich gesehen vor dem Beginn der Datenerhebung im TETRA-Forschungsprojekt durchgeführt. Bei dieser Arbeit wurde die expositionsbedingte Erwärmung nicht in einem gesundheitlichen Zusammenhang betrachtet, sondern es wurde mit der Überprüfung, ob eine durch ein simuliertes TETRA-Endgerätsignal erzeugte oberflächliche Erwärmung subjektiv wahrgenommen werden kann und der damit einhergehenden Gefahr einer Entblindung, einem ganz wichtigen methodischen Aspekt in der TETRA- bzw. EMF-Forschung nachgegangen. Die Ergebnisse dieser Studie waren nicht nur für die geplante Umsetzung des TETRA-Forschungsprojektes richtungsweisend, sondern sind prinzipiell für die Durchführung von Studien, die dem wissenschaftlichen Standard entsprechen, von großer Bedeutung.

Die einzelnen Ergebnisse der Teiluntersuchungen sollen unter Einbeziehung der anderen EEG-basierten Ergebnisse aus dem TETRA-Forschungsprojekt im Sinne des Strahlenschutzes interpretiert und bewertet werden.

2. DIE EINZELLEISTUNGEN

Alle hier präsentierten Ergebnisse sind in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften mit peer-review Verfahren und Impactfaktor (IF) veröffentlicht worden. Im Folgenden werden die Teiluntersuchungen, auf die sich die hier berücksichtigten Publikationen beziehen, getrennt voneinander betrachtet. In jedem Unterpunkt wird neben einer kurzen Zusammenfassung der Untersuchung auch der geleistete Eigenanteil an der Einzelleistung bezüglich Konzeption, Durchführung und Berichtsabfassung ausgewiesen. Anschließend folgt dann jeweils die entsprechende Publikation.

2.1. STUDIE ZUR ÜBERPRÜFUNG DER WÄRMEWAHRNEHMUNG

Die Ergebnisse der Vorstudie zur Wärmewahrnehmung wurden in der Zeitschrift *Bioelectromagnetics* mit einem IF von 1,705 publiziert:

Dorn H, Schmid G, Eggert T, Sauter C, Bolz T, Danker-Hopfe H (2014). *Experimental Investigation of Possible Warmth Perception from a Head Exposure System for Human Provocation Studies with TETRA Handset-like Signals*. *Bioelectromagnetics*; 35(6): 452-458; DOI: [10.1002/bem.21866](https://doi.org/10.1002/bem.21866)

2.1.1. KURZE ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIE

Die Studie zielte darauf ab, herauszufinden, ob eine mögliche oberflächliche Erwärmung, resultierend aus der Absorption von drei unterschiedlichen Expositionssignalen (Sham, TETRA 1,5 W/kg und TETRA 6 W/kg), von Testpersonen subjektiv wahrgenommen werden kann, und darauf aufbauend, ob dadurch eine Unterscheidung zwischen den Expositionsbedingungen ermöglicht wird. Eine Bestätigung dieser Vermutung hätte nicht nur erhebliche Konsequenzen für die doppelblinde Versuchsdurchführung im TETRA-Forschungsprojekt gehabt, sondern auch für die Bewertung entsprechender anderer Studien. Anlass der Überprüfung dieser Fragestellung waren Ergebnisse von dosimetrischen Messungen am Phantomkopf im Zuge der Expositionseinrichtung, aus denen hervorging, dass das stärkere TETRA-Signal mit einem SAR-Wert von 6 W/kg mit einer in unmittelbarer Nähe zum Expositionsort messbaren Temperaturerhöhung einhergeht (Bolz et al., 2010).

An der Vorstudie nahmen 15 männliche Probanden (28,4 +/- SD 3,7 Jahre) teil, die für ihre Teilnahme entlohnt wurden. Ein- und Ausschlusskriterien gab es für diese Studie nicht. Die Studie wurde bei der zuständigen Ethikkommission 4 am Campus Benjamin Franklin

eingereicht und bewilligt (23.6.2010; Addendum zum Ethikantrag mit der Antragsnummer: EA4/115/09). Sie wurde in Übereinstimmung mit den *Ethischen Grundsätzen für die medizinische Forschung am Menschen* (Deklaration von Helsinki, revidierte Version vom Oktober 2000 - Edinburgh) durchgeführt. Jeder Studienteilnehmer musste neun Messungen absolvieren, die probandenspezifisch jeweils zu einem annähernd gleichen Tageszeitpunkt stattfanden. Zwischen zwei Messungen wurde mindestens ein Abstand von 24 Stunden eingehalten. Die Expositionsstufen (Sham, TETRA 1,5 W/kg, TETRA 6 W/kg) wurden den neun Messungen einem randomisierten doppelblinden cross-over Design folgend zugeordnet (je drei Messungen pro Expositionsstufe). Für die beiden Verum-Bedingungen wurde ein pulsmoduliertes HF-Signal mit einer Trägerfrequenz von 385 MHz, einer Pulsbreite von 14,17 ms und einer Periodendauer von 56,67 ms (Tastverhältnis 25 %, Pulsfrequenz 17,6 Hz) verwendet. Die Dauer der Exposition betrug jeweils 30 Minuten und erfolgte über eine am linken Ohr angebrachte speziell für diese Studie entwickelte Antenne. Parallel wurde die Temperatur auf der Haut in unmittelbarer Nähe zum Expositionsort gemessen. Zur Einschätzung der subjektiven Wärmewahrnehmung wurden im Anschluss an die Exposition Fragebögen eingesetzt.

Die parallel zur TETRA-Exposition durchgeführten Temperaturmessungen an zwei Lokalisationen haben ergeben, dass die Hauttemperatur in unmittelbarer Nähe zur Antenne mit den Expositionsstufen ansteigt (mit einer über die Lokalisationen gemittelten maximalen Erwärmung von 0,35 °C unter TETRA 1,5 W/kg und von 0,8 °C unter TETRA 6 W/kg). Statistisch signifikant war jedoch nur der Temperaturunterschied zur Sham-Bedingung unter der höheren Expositionsstufe. Unter beiden Bedingungen wurde der maximale Temperaturanstieg bereits nach etwa zehnminütiger Exposition erreicht. Anhand der subjektiven Angaben der Probanden konnte allerdings festgestellt werden, dass diese expositionsbedingten Temperaturunterschiede nicht bemerkt wurden. Die doppelblinde Versuchsdurchführung im TETRA-Forschungsprojekt war also nicht gefährdet.

2.1.2. GELEISTETER EIGENANTEIL AN DIESER EINZELLEISTUNG

Konzeption: Mitwirkung an der Planung der Studie

Durchführung: Verantwortlich für die Probandenrekrutierung und für die Datenerhebung

Berichtsabfassung: Beteiligung an der statistischen Auswertung der Daten, wesentliche Anteilnahme an der Formulierung des Manuskripts

2.1.3. PUBLIKATION: *EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF POSSIBLE WARMTH PERCEPTION FROM A HEAD EXPOSURE SYSTEM FOR HUMAN PROVOCATION STUDIES WITH TETRA HANDSET-LIKE SIGNALS*

2.2. TEILUNTERSUCHUNG ZUR ÜBERPRÜFUNG EINES EINFLUSSES VON TETRA- ENDGERÄTSIGNALEN AUF LANGSAME HIRNPOTENTIALE

Die Ergebnisse dieser Teiluntersuchung sind in der Zeitschrift *Environmental Research* mit einem IF von 4,373 publiziert worden:

Eggert T, Dorn H, Sauter C, Marasanov A, Hansen ML, Peter A, Schmid G, Bolz T, Danker-Hopfe H (2015). *Terrestrial Trunked Radio (TETRA) exposure and its impact on slow cortical potentials*. *Environmental Research*; 143(Pt A): 112-122; DOI: [10.1016/j.envres.2015.09.022](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.09.022)

2.2.1. KURZE ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIE

Bei dieser Studie wurde der Frage nachgegangen, ob eine TETRA-Exposition elektro-physiologische Korrelate der kognitiven Verarbeitung als Ausdruck der phasischen Aktivität beeinflussen kann. Unter phasischer Aktivität wird eine kurzzeitig gesteigerte Aktivierung infolge eines relevanten Ereignisses verstanden (Weeß et al., 1998). Mit Ereignis kann entweder die Reizdarbietung oder die Reaktion auf einen Reiz gemeint sein. In dieser Studie wurden ereignisbezogene Hirnaktivitäten herangezogen, die im Zusammenhang mit einer Vorbereitung auf ein späteres, gezieltes Handeln stehen und als langsame Hirnpotentiale (LP) bezeichnet werden (Birbaumer et al., 1990). Es wurden drei unterschiedliche LP berücksichtigt, deren Erzeugung jeweils über einen eigenständigen Test erfolgte: (1) Ein LP infolge einer visuellen Folgereaktionsaufgabe (*visual monitoring task*, VMT), (2) die *contingent negative variation* (CNV) oder auch Erwartungswelle über eine Zwei-Stimulus-Aufgabe, und (3) das Bereitschaftspotential (*readiness potential*, BP) mittels einer einfachen selbstinitiierten Tastendruckaufgabe. Zielparameter aller drei LP war die Amplitude unmittelbar vor der Reaktion an den jeweiligen LP-spezifischen EEG-Elektrodenpositionen. Für das BP wurde zusätzlich die Amplitude einer früheren Komponente, die bis kurz vor Bewegungsbeginn andauert, analysiert. Bei der VMT sowie der Zwei-Stimulus-Aufgabe wurden darüber hinaus auch Verhaltensparameter ausgewertet. Da zum einen ein wissenschaftlich anerkannter biophysikalischer Erklärungsansatz für die im Mobilfunkbereich beobachteten EEG-Effekte fehlt und zum anderen direkte in wissenschaftlichen peer-review Zeitschriften veröffentlichte Vergleichsdaten aus der TETRA-Forschung fehlten, wurden mögliche Effekte in Anlehnung an Ergebnisse von Studien der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) überprüft, in denen der Einfluss einer GSM 900-Exposition auf dieselben LP untersucht wurde (Freude et al., 1998; Freude et al., 2000). Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine TETRA-Exposition keinen Einfluss auf das BP hat, dagegen aber unter der TETRA-

Exposition eine Abnahme der Amplitude des VMT-LP und eine stärker ausgeprägte CNV-Amplitude beobachtet werden kann.

Es nahmen an dieser Studie ausschließlich gesunde männliche (potenzielle) Nutzer des Digitalfunks zwischen 18 und 30 Jahren teil, die zusätzlich noch rechtshändig und Nichtraucher sein mussten sowie nicht regelmäßig im Schichtdienst tätig sein durften. Eine Auflistung sämtlicher in der Studie berücksichtigter Ein- und Ausschlusskriterien findet sich in (Danker-Hopfe et al., 2014). Die Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien erfolgte in einem umfangreichen Screeningverfahren, welches (1) ein Telefoninterview, (2) validierte Fragebögen, (3) eine medizinische Untersuchung inklusive Elektrokardiogramm und Wach-EEG, (4) eine ambulante objektive Bewertung der Schlafqualität und (5) eine Screeningnacht im Labor zur Abklärung etwaiger Schlafstörungen sowie zur Eingewöhnung an die Laborbedingungen umfasste. In die Datenauswertung sind Ergebnisse von 30 Probanden eingegangen, die ein Durchschnittsalter von 25,4 +/- SD 2,6 Jahre aufwiesen. Für die Studie liegt ein positives Ethikvotum der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin vor (03.12.2009; Antragsnummer: EA4/115/09). 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. Die hier berücksichtigten Tests zur Erzeugung der LPs waren Teil einer am Tage stattfindenden psychophysiologischen Testbatterie. Nach einer ersten Tagesuntersuchung, die darauf abzielte, alle Tests zur Minimierung möglicher Übungseffekte zu trainieren, kamen die Probanden zu jeweils neun weiteren Tagesuntersuchungen ins Labor, die in der Regel in einem zweiwöchigen Rhythmus stattfanden. Um eine etwaige Variabilität bedingt durch den Wochentag so gering wie möglich zu halten, wurde versucht, die Untersuchungen für jeden Probanden am gleichen Wochentag stattfinden zu lassen. Die Tagesuntersuchungen begannen gegen 16:00 Uhr, um tageszeitbedingte Unterschiede in den Testleistungen zu kontrollieren, und dauerten etwa 2 Stunden. Die Tests zur Erzeugung der LPs fanden gegen Mitte der Testbatterie statt. Wie in der Vorstudie zur Wärmewahrnehmung wurden auch hier drei verschiedene Expositionsstufen (Sham, TETRA 1,5 W/kg und TETRA 6 W/kg) nach einem randomisierten doppelblinden cross-over Design (basierend auf einer Sequenz in einem Beerenblut-Design) auf die neun Tagesuntersuchungen aufgeteilt, wobei jede Expositionsstufe dreimal vorkommen musste. Auch in dieser Studie wurde für die beiden Verum-Expositionsstufen ein pulsmoduliertes Hochfrequenzsignal mit einer Trägerfrequenz von 385 MHz, einer Pulsbreite von 14,17 ms und einer Periodendauer von 56,67 ms (d.h. Tastverhältnis 25 %, Pulsfrequenz 17,6 Hz) verwendet. Die Tests zur Erzeugung der LP wurden von den Probanden unter Befeldung absolviert, da die Exposition über die komplette Tagesuntersuchung hinweg aktiv war.

Die Auswertung der Daten zeigte, dass die TETRA-Exposition weder einen Einfluss auf die Amplitude der untersuchten LPs (VMT-abhängiges LP, CNV und BP) an den berücksichtigten EEG-Lokalisationen noch auf die mit diesen Aufgaben assoziierten Testleistungen (VMT: Winkelabweichung; CNV: Reaktionszeit) hatte. Die hier präsentierte Studie reiht sich somit in die Mehrzahl der EEG-Studien ein, die keine Auswirkungen von HF-EMF auf das ZNS bei kognitiver Beanspruchung gefunden haben. Hinweise für eine mögliche Gesundheitsbeeinträchtigung durch HF-EMF können aus diesen Studienergebnissen entsprechend nicht abgeleitet werden.

2.2.2. GELEISTETER EIGENANTEIL AN DIESER PUBLIKATION

Konzeption: Da es sich bei dem TETRA-Projekt um ein ausgeschriebenes drittmittelfinanziertes Forschungsvorhaben handelte, war das Studiendesign bereits vertraglich vorgegeben

Durchführung: Verantwortlich für die Probandenrekrutierung und -betreuung sowie für die Terminplanung und Studienkoordination, umfangreiche Beteiligung an der Datenerhebung

Berichtsabfassung: Erstellung eines Entwurfs des gesamten Texts dieser Publikation, Durchführung der statistischen Analyse, Erstellung aller in der Publikation vorkommender Abbildungen und Tabellen

2.2.3. PUBLIKATION: *TERRESTRIAL TRUNKED RADIO (TETRA) EXPOSURE AND ITS IMPACT ON SLOW CORTICAL POTENTIALS*

2.3. TEILUNTERSUCHUNG ZUR ÜBERPRÜFUNG EINES EINFLUSSES VON TETRA- ENDGERÄTSIGNALEN AUF KOGNITIVE LEISTUNGEN UND DAS SUBJEKTIVE WOHLBEFINDEN

Die Ergebnisse dieser Teiluntersuchung sind ebenfalls in der Zeitschrift *Environmental Research* mit einem IF von 4,373 publiziert worden:

Sauter C, Eggert T, Dorn H, Schmid G, Bolz T, Marasanov A, Hansen ML, Peter A, Danker-Hopfe H (2015). *Do signals of a hand-held TETRA transmitter affect cognitive performance, well-being, mood or somatic complaints in healthy young men? Results of a randomized double-blind cross-over provocation study.* *Environmental Research*; 140: 85-94; DOI: [10.1016/j.envres.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.021)

2.3.1. KURZE ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIE

In dieser Studie wurde zum einen untersucht, ob das subjektive Wohlbefinden durch eine TETRA-Exposition beeinflusst wird. Das subjektive Wohlbefinden wurde vor Beginn und nach dem Ende einer Tagesuntersuchung mittels Selbstbeurteilungsfragebögen erfasst, um eine mögliche unter Exposition beobachtete Veränderung feststellen zu können. Dabei kamen visuelle Analogskalen sowie validierte Verfahren wie ein Beschwerdefragebogen und Fragebögen zur Erfassung von Angst und zum aktuellen Gefühlszustand zum Einsatz. Für eine detaillierte Beschreibung der Fragebögen sei jedoch auf die Publikation verwiesen. Zum anderen zielte diese Studie darauf ab, den Einfluss einer TETRA-Exposition auf kognitive Leistungen gemessen an Verhaltensleistungen zu prüfen. Hierfür wurden die Ergebnisse von Tests zur Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis herangezogen. Diese Tests umfassten eine Aufgabe zur geteilten Aufmerksamkeit, bei welcher die Aufmerksamkeit gleichzeitig auf akustische und visuelle Reize gerichtet werden musste, sowie jeweils eine Aufgabe zur Vigilanz und zur selektiven Aufmerksamkeit. Die letzten beiden Tests haben gemeinsam, dass sie eine lange Aufmerksamkeitsspanne erfordern, bei einem Vigilanztest jedoch nur auf eine geringe Anzahl an Zielreizen reagiert werden soll, während die Reizdichte bei Tests zur selektiven Aufmerksamkeit dagegen sehr hoch ist. Die Überprüfung des Arbeitsgedächtnisses erfolgte über eine n-back-Aufgabe. Diese vier Tests stellten den Abschluss der während einer Tagesuntersuchung durchgeführten Testbatterie dar. Zielparameter waren bei allen vier Tests die mittlere Reaktionszeit sowie die Anzahl korrekter Reaktionen, während bei den Tests zur Aufmerksamkeit noch die Standardabweichung der Reaktionszeit berücksichtigt wurde. Für zusätzliche methodische Informationen zu den Probanden, dem Ablauf und der Exposition sei auf die Kurzbeschreibung der Teiluntersuchung unter 2.2.1. verwiesen. Aufgrund der geringen Anzahl verfügbarer Vergleichsdaten, die sich auch noch auf abweichenden

de Zielvariablen beziehen (Nieto-Hernandez et al., 2011; Riddervold et al., 2010), wurden für diese Studie keine konkreten Hypothesen aufgestellt, sondern die Überprüfung erfolgte explorativ.

Die statistische Analyse ergab, dass die Standardabweichung der Reaktionszeit beim Vigilanztest von der niedrigeren TETRA-Exposition betroffen war, und zwar im Sinne einer geringeren Streuung des Antwortverhaltens. Bei der n-back-Aufgabe zur Überprüfung des Arbeitsgedächtnisses wurden inkonsistente Expositionseffekte gefunden, die sowohl als Verbesserung (mittlere Reaktionszeit in der 2-back-Aufgabe) als auch als Verschlechterung (mittlere Reaktionszeit und Anzahl korrekter Antworten in der 1-back-Aufgabe) der Verhaltensleistung interpretiert werden können. Das subjektive Wohlbefinden sowie körperliche Symptome waren hingegen bis auf eine visuelle Analogskala zum Aspekt „Interesse“ (gesteigertes Interesse infolge der Exposition) nicht durch die TETRA-Exposition beeinflusst. Es wurde geschlussfolgert, dass die beobachteten vereinzelt Expositionseffekte bezüglich kognitiver Leistungen und dem Wohlbefinden keine Evidenz für gesundheitsschädigende Wirkungen von HF-EMF im Allgemeinen und der Signalcharakteristik des TETRA-Funkstandards im Speziellen Wirkungen liefern.

2.3.2. GELEISTETER EIGENANTEIL AN DIESER PUBLIKATION

Konzeption: Da es sich bei dem TETRA-Projekt um ein ausgeschriebenes drittmittelfinanziertes Forschungsvorhaben handelte, war das Studiendesign bereits vertraglich vorgegeben

Durchführung: Verantwortlich für die Probandenrekrutierung und -betreuung sowie für die Terminplanung und Studienkoordination, umfangreiche Beteiligung an der Datenerhebung

Berichtsabfassung: Durchführung der statistischen Analyse sowie Formulierung des dazugehörigen Textabschnitts

2.3.3. PUBLIKATION: *DO SIGNALS OF A HAND-HELD TETRA TRANSMITTER AFFECT COGNITIVE PERFORMANCE, WELL-BEING, MOOD OR SOMATIC COMPLAINTS IN HEALTHY YOUNG MEN? RESULTS OF A RANDOMIZED DOUBLE-BLIND CROSS-OVER PROVOCATION STUDY*

3. DISKUSSION

Ziel der hier vorliegenden kumulativen Promotionsschrift war es, den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu möglichen akuten biologischen Effekten von HF-EMF auf den Menschen mit Ergebnissen aus der TETRA-Forschung zu ergänzen.

3.1. THERMISCHE AUSWIRKUNGEN VON HF-EMF

In der Studie zur Überprüfung der Wärmewahrnehmung standen die thermischen Auswirkungen einer HF-Exposition im Vordergrund. HF-EMF werden von organischem Gewebe absorbiert und können dabei Polarisierungseffekte, Orientierungsschwingungen permanenter Dipole (z. B. Wasser), Schwingungs- und Rotationsbewegungen innerhalb von Molekülen oder Verschiebungen freier Ladungsträger auslösen, wodurch Reibungsverluste entstehen, die zu einer Erwärmung des Gewebes führen (LUBW/LfU, 2010). Unter der Bedingung, dass ein mobiles Endgerät am Kopf mit direktem Kontakt zur Haut verwendet wird, tragen zu dieser Erwärmung neben dem HF-bedingten Anteil auch noch die Verlustleistung des verwendeten mobilen Endgerätes und die durch den Hautkontakt entstandene Isolierung bei (Schmid et al., 2008). Generell gilt, dass sich aus der Frequenz des HF-Trägersignals die Eindringtiefe ableiten lässt. Je kürzer die Welle, desto weniger tief dringen die Felder ins Gewebe ein. Entsprechend wird bei den relativ hohen Trägerfrequenzen, die allgemein von den drahtlosen Kommunikationssystemen (inkl. des TETRA-Standards) genutzt werden, die meiste Energie lokal bzw. oberflächlich absorbiert (LUBW/LfU, 2010).

Wärmeausgleichsmechanismen sorgen infolge einer starken HF-Befeldung dafür, dass die lokale Temperaturerhöhung nicht zu groß wird. Zu diesen Mechanismen zählen die elektromagnetische Temperaturabstrahlung in Form von Infrarotstrahlung, die thermokinetische Wärmeübergabe von der Haut an die Luft (Wärmeleitung), die Abfuhr der Wärme über die Blutgefäße von Muskulatur und inneren Organen an die Haut (Wärmekonvektion) und der Wärmeentzug durch Schwitzen (Müller, 2004). Sowohl die Wärmeabgabe durch Konvektion als auch durch Schwitzen sind autonom gesteuerte kühlende thermoregulatorische Vorgänge, die homoiothermen Lebewesen wie dem Menschen dazu dienen, die Körperkerntemperatur gegen externe und interne Temperaturbelastungen relativ konstant halten zu können. Die Koordination der Thermoregulation erfolgt hauptsächlich im Hypothalamus. Die Fähigkeit zur Erkennung von Temperaturänderungen wird als Thermorezeption bezeichnet. Das Empfinden von Wärme und Kälte erfolgt über Rezeptoren in der Haut, die als Messfühler im Temperatur-Regelkreis fungieren. Weitere thermosensitive Sensoren wurden im ZNS und in tiefen Körpergeweben außerhalb des ZNS nachgewiesen. Die inneren Thermosensoren sind

ebenfalls Teil des Temperatur-Regelkreises, scheinen in erster Linie jedoch an der Aktivierung der Thermoregulation infolge von Änderungen der Körperkerntemperatur beteiligt zu sein (Schmidt et al., 2011).

Für den TETRA-Funk konnten Dimbylow et al. (2003) in einer Finite Difference Time Domain (FDTD)-Computersimulation zeigen, dass mobile Endgeräte bei bestimmten Gebrauchshaltungen vor dem Gesicht und neben dem Kopf mit lokalen SAR-Werten einhergehen können, die messbare oberflächliche Erwärmungen vermuten lassen. Diese Beobachtungen konnten an einem anderen anatomischen Kopfmodell mit einem realistischen Quellenmodell eines TETRA-Handfunkgerätes (400 MHz Trägersignal) unter vergleichbaren Haltungsbedingungen größtenteils bestätigt werden (Schmid et al., 2008). In dieser FDTD-Untersuchung wurden zusätzlich noch die aus der HF-Absorption resultierenden Temperaturanstiege ermittelt. Die Berechnungen ergaben, dass in peripheren Gewebeschichten wie der Haut ein Temperaturanstieg von bis zu 0,8 °C auftreten kann. Dosimetrische Messungen am Phantomkopf im Zuge der Expositionseinrichtung für das TETRA-Forschungsprojekt ergaben ähnliche Ergebnisse für das in der Studie vorgesehene stärkere TETRA-Signal mit einem SAR-Wert von 6 W/kg (Bolz et al., 2010). Aus experimentellen Humanstudien ist dagegen bekannt, dass ein simuliertes Telefonat mit unterschiedlichen Mobiltelefonen zwar zu statistisch signifikanten Erhöhungen der Hauttemperatur führen kann (bis zu 4,5 °C), der aus der HF-EMF-Absorption bedingte Beitrag daran jedoch als eher gering einzustufen ist. Vielmehr scheinen für die Hauterwärmung die Isolierung durch die Mobiltelefone und die Verlustleistung der Mobiltelefone verantwortlich zu sein (Anderson und Rowley, 2007; Straume et al., 2005). Da allerdings im TETRA-Forschungsprojekt zumindest mit der höheren Leistungsstufe eine stärkere Exposition als in den eben genannten Mobilfunkstudien zum Einsatz kam (bei Straume et al. (2005) wurde ein max. SAR-Wert von 0,81 W/kg im Bereich der Wange gemessen), war zu vermuten, dass die HF-bedingte Hauttemperaturerhöhung größer ausfällt. Die Ergebnisse aus der Studie zur Wärmewahrnehmung haben gezeigt, dass eine 30-minütige TETRA-Exposition mit einer Sendeleistung von 6 W/kg zu einer messbaren und im Vergleich zur Sham-Bedingung auch statistisch signifikanten oberflächlichen Temperaturerhöhung in unmittelbarer Nähe zum Expositionsort führt. Der gemessene Temperaturanstieg unter der höheren Expositionsstufe betrug über zwei Messpunkte gemittelt max. 0,8 °C, wovon ungefähr 0,6 °C auf die HF-Absorption und die restlichen ca. 0,2 °C auf die Verlustleistung der Antenne zurückgeführt werden konnten. Die eingeschränkte Wärmeübertragung an die Umgebung wegen der direkt auf der Haut anliegenden Antenne wurde vernachlässigt, da dieser Effekt gleichermaßen auch für die Sham-Bedingung zutraf. Der gemessene Temperaturanstieg unter der niedrigeren Expositionsstufe betrug über zwei Messpunkte gemittelt max. 0,35 °C. Unter beiden Bedingungen wurde der maximale Temperaturanstieg bereits

nach etwa zehnmütiger Exposition erreicht. Die hier im Humanversuch unter Exposition gemessenen Hauttemperaturerhöhungen zeigten damit eine sehr gute Übereinstimmung mit den computerbasierten Ergebnissen von Schmidt et al. (2008).

In einem zweiten Schritt wurde in dieser Studie überprüft, ob die gemessene Hauttemperaturerhöhung auch von den Probanden subjektiv wahrgenommen wurde. In einer Untersuchung von Blick et al. (1997) wurden an 16 Probanden Wahrnehmungsschwellen von HF-bedingten Erwärmungen infolge unterschiedlicher Expositionssignale im GHz-Bereich bestimmt. Die Befeldung erfolgte großflächig auf dem Rücken der Probanden für die Dauer von jeweils 10 Sekunden. Es zeigte sich, dass die Wahrnehmungsschwelle mit Zunahme der Frequenz kleiner wurde. Da es allerdings bisher keine vergleichbaren Studien zu einer möglichen Wahrnehmung von expositionsbedingter Erwärmung für kleinere HF-Frequenzbereiche gab und in der Vorstudie zur Wärmewahrnehmung eine deutlich kleinere Fläche über einen längeren Zeitraum exponiert wurde, konnte im Vorhinein keine Aussagen darüber getroffen werden, ob die Erwärmung von den Probanden bemerkt wird. Eine Wahrnehmung hätte eine Entblindung zur Folge gehabt und diese potentielle Gefahr sollte noch im Vorfeld des TETRA-Forschungsprojektes abgeklärt werden. Anhand der Angaben in den Fragebögen stellte sich allerdings heraus, dass die Probanden weder in der Lage waren, die Erwärmung wahrzunehmen, noch, dass es ihnen möglich war, zwischen den Expositionsbedingungen zu unterscheiden. Das doppelblinde Versuchsdesign im TETRA-Forschungsprojekt war also nicht gefährdet. Begründet wurden diese Beobachtungen mit den Ergebnissen der Untersuchung von simulierter TETRA-Exposition am anatomischen Kopfmodell von Schmid et al. (2008) unter Einbeziehung des Wärmewahrnehmungsmodells von Hendler und Hardy (1960). Laut diesem Modell stellt ein Temperaturgradient zwischen zwei in unterschiedlichen Tiefen der Haut lokalisierten Thermorezeptoren von $0,01\text{ °C}$ einen überschweligen Reiz dar. Schmidt et al. (2008) überprüften am anatomischen Kopfmodell mit einem simulierten TETRA-Endgerät, welche maximale oberflächliche Hauterwärmung jeweils von den drei bei Betrieb relevanten Faktoren (Erwärmung durch HF-Absorption, durch Verlustleistung des mobilen Endgerätes und infolge eines eingeschränkten Wärmeaustausches mit der Umgebung) erwartet werden kann, und welche Temperaturgradienten in der Haut aus diesen einzelnen lokalen Wärmebeiträgen resultieren können. Unter Berücksichtigung dieser computerbasierten Ergebnisse konnte für die in der Vorstudie gemessene Hauttemperaturerhöhung unter der höheren Leistungsstufe von max. $0,8\text{ °C}$ dargestellt werden, dass sich aus der HF-bedingten Erwärmung von $0,6\text{ °C}$ ein maximaler Temperaturgradient in der Haut von etwa $0,004\text{ °C}$ und aus der Verlustleistung der Antenne von $0,2\text{ °C}$ ein maximaler Temperaturgradient in der Haut von etwa $0,006\text{ °C}$ ergab. Zusammengerechnet konnte also ein Hauttemperaturgradient von kleiner oder gleich $0,01\text{ °C}$ ermittelt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vorstudie zur Wärmewahrnehmung weitere Hinweise zum Thema HF-Absorption im menschlichen Körper hervorgebracht hat. Obwohl relativ hohe statistisch signifikante Hauttemperaturerhöhungen gemessen werden konnten, fand keine subjektive Wahrnehmung dieser Erwärmung statt. Diese Beobachtung könnte entweder damit erklärt werden, dass der Wärmereiz nicht ausreichend stark war, um einen überschweligen Temperaturgradienten in der Haut zu verursachen, oder dass der Hypothalamus Informationen über die lokale Erwärmung erhalten hat und daraufhin thermoregulatorische Prozesse eingeleitet wurden, die einen Wärmeausgleich bewirkt haben. Kortikale Strukturen sind vermutlich nicht involviert gewesen, da kein bewusstes subjektives Empfinden ausgelöst wurde. Letztere Vermutung wird möglicherweise dadurch gestützt, dass thermoregulatorische Prozesse etwa erst nach sechs bis zehn Minuten wirksam werden (LUBW/LfU, 2010). Dies passt sehr gut zu den gemessenen Temperaturanstiegen in der Vorstudie, die ihren Maximalwert nach etwa zehn Minuten erreicht hatten und anschließend konstant blieben. Des Weiteren haben sowohl die Geschwindigkeit der Temperaturänderung als auch die Größe der Expositionsfläche einen Einfluss auf Wahrnehmungsschwellen. In der Vorstudie verlief der Temperaturanstieg relativ langsam und die Hautfläche, die von der Temperaturänderung betroffen war, war eher klein. Beides geht mit eher höheren Wahrnehmungsschwellen einher (Birbaumer und Schmidt, 2006). Mit den untersuchten Leistungsstufen unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (TETRA 1,5 W/kg) und für beruflich exponierte Personen (TETRA 6 W/kg) war es also möglich, das Gewebe um den Expositionsort herum leicht zu erwärmen. Entsprechend liefert die Vorstudie zur Wärmewahrnehmung im Sinne des Strahlenschutzes keine Evidenz für eine gesundheitsschädigende Wirkung von HF-EMF im Allgemeinen und der Signalcharakteristik des TETRA-Funkstandards im Speziellen. Aus den Ergebnissen der Vorstudie zur Wärmewahrnehmung kann aber auch geschlossen werden, dass bei experimentellen Humanstudien mit einem ähnlichen Versuchsaufbau, in denen (TETRA)-Expositionen mit SAR-Werten von bis zu 6 W/kg unter Verwendung dieser planaren Antenne zum Einsatz kommen sollen, die doppelte Verblindung nicht durch thermische Wahrnehmung gefährdet ist. Entsprechend können bei zukünftigen EMF-Humanprovokationsstudien zur Abschätzung des Entblindungsrisikos diese Ergebnisse als Quelle verwendet werden. Für die Durchführung des TETRA-Forschungsprojekts war der Ausgang dieser Vorstudie so entscheidend, dass bei Bestätigung der subjektiven Wärmewahrnehmung eine erhebliche Änderung der Expositionseinrichtung erforderlich geworden wäre. In einem sehr aufwendigen Unterfangen hätte die Antenne zusätzlich mit einer Heizung ausgestattet werden müssen, um sicherzustellen, dass unter allen drei Expositionsbedingungen eine vergleichbare Erwärmung induziert wird.

3.2. AUSWIRKUNGEN GEPULSTER HF-EMF

In der EMF-Forschung wird kontrovers diskutiert, ob neben der thermischen Wirkung auch noch andere Wirkmechanismen für HF-EMF existieren, die unabhängig von einer Erwärmung erklärt werden können (BMU, 2012). Die Überprüfung einiger solcher Wirkmechanismen infolge einer HF-Befeldung unterhalb der Grenzwerte wie z.B. ein schädigender Einfluss auf das Erbmateriale, Veränderungen des Zellstoffwechsels, der Zellfunktionen und der Stressreaktion in Zellen sowie eine Verminderung der Melatoninsynthese waren Gegenstand einer Reihe von Studien, die im Rahmen des DMF durchgeführt wurden. Dabei stellte sich heraus, dass keiner von den untersuchten Endpunkten von einer HF-Exposition betroffen war (BfS, 2008). Ein weiterer Endpunkt, der in diesem Zusammenhang erwähnt werden muss, zielt auf die Frage ab, ob die HF-Signale der mobilen Endgeräte, die in der Regel in der Nähe des Kopfes genutzt werden, mit Signalvorgängen an den Nervenzellen in Wechselwirkung treten können. Dabei ist besonders der Vorgang der Demodulation des gepulsten HF-Signals von Interesse, da die verwendeten niederfrequenten Modulationskomponenten des Mobil- und Digitalfunks im Frequenzbereich der Hirnaktivität liegen. Die direkte Interaktion gepulster Funksignale mit den (elektro-)chemischen Vorgängen im Gehirn könnte Veränderungen im EEG hervorrufen. Untersuchungen, die mittels EEG zeigen konnten, dass eine Mobilfunkexposition u.a. mit physiologischen Veränderungen der Gehirnaktivität im Wachzustand einhergehen kann (z.B. Croft et al., 2010; SCENIHR, 2015; Vecchio et al., 2010; Vecchio et al., 2012), haben zu diesen Vorstellungen beigetragen, auch wenn die Ergebnisse nicht als gesundheitsschädigend eingestuft wurden (AGNIR, 2012; SCENIHR, 2015; SSK, 2011). Durch die Überprüfung, inwieweit HF-EMF des TETRA-Funks das ZNS beeinflussen können, wurde genau dieser Sachverhalt im TETRA-Forschungs-Projekt und den beiden hier berücksichtigten Teiluntersuchungen aus diesem Projekt aufgegriffen.

In der Teiluntersuchung zu den LP stellte sich heraus, dass die TETRA-Exposition weder einen Einfluss auf die elektrophysiologischen noch auf die behavioralen Zielparameter der untersuchten ereignisbezogenen Hirnaktivitäten hatte. Diese Beobachtungen stehen teilweise im Widerspruch zu Ergebnissen von Untersuchungen der BAuA, die Auswirkungen einer GSM-Exposition auf dieselben LP beobachtet haben. Das BP in der Tastendruckaufgabe blieb zwar wie hier auch nach der GSM-Exposition unverändert, doch bei dem Potential der VMT zeigte sich eine unter Exposition beobachtete Abnahme der Amplitude in den zentralen und parieto-temporo-okzipitalen Hirnregionen (Freude et al., 1998; Freude et al., 2000). Diese Ergebnisse konnten in einer Folgestudie derselben Arbeitsgruppe unter ähnlichen Expositionsbedingungen größtenteils bestätigt werden (Freude et al., 2000). In dieser Nachfolgestudie wurde zusätzlich noch die Zwei-Stimulus-Aufgabe zur Erzeugung einer CNV durch-

geführt. Ein direkter EMF-Einfluss auf die Erwartungswelle konnte zwar nicht beobachtet werden, jedoch wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zugunsten einer stärker ausgeprägten Amplitude in frontalen Regionen unter GSM-Exposition gefunden (Freude et al., 2000). Die Unterschiede zwischen den Studienresultaten könnten in der Signalcharakteristik (TETRA vs. GSM), der stark differierenden Anzahl an Studienteilnehmern (30 Probanden vs. 16 Probanden), der verwendeten Verblindungsmethode (doppelblind vs. einfachblind) und/oder in der Tageszeit, zu der die Tests durchgeführt wurden (nachmittags vs. vormittags), begründet liegen.

Die Teiluntersuchung zu den kognitiven Leistungen bei verschiedenen psychologischen Testverfahren und zum subjektiven Wohlbefinden ergab sporadische, aber inkonsistente unter Exposition beobachtete Auswirkungen auf die untersuchten Verhaltensparameter sowie keine Auswirkungen auf das subjektive Wohlbefinden und die erfassten körperlichen Symptome. In der Publikation von Sauter et al. (2011) absolvierten Probanden genau die gleichen Tests wie in der berücksichtigten Teiluntersuchung, diesmal nur unter einer Sham-, einer GSM- und einer UMTS-Exposition. Dabei konnten unter den Mobilfunkbedingungen im Vergleich zu Sham ebenfalls vereinzelte Abweichungen in den untersuchten Verhaltensparametern gefunden werden, die jedoch nach Korrektur für multiples Testen keinen Bestand mehr hatten. Die einzige Studie zu möglichen Auswirkungen von TETRA-Endgerätsignalen auf kognitive Funktionen, die bisher in einer wissenschaftlichen peer-review Zeitschrift publiziert wurde, ist die im Rahmen des Dänischen Mobilfunkforschungsprogramms durchgeführte Studie von Riddervold et al. (2010). In dieser Untersuchung konnte beobachtet werden, dass sich die Leistungen bei vier Testverfahren zur Überprüfung der Reaktionsfähigkeit, der Aufmerksamkeit sowie des Kurzzeit- und des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses unter einer TETRA-Exposition nicht von denen unter einer Sham-Exposition unterschieden. Bei den zusätzlich erfassten körperlichen Symptomen konnte ebenfalls kein statistisch signifikanter Expositionseinfluss festgestellt werden. Dieser Befund zu Auswirkungen von TETRA-Endgerätsignalen auf körperliche Symptome konnte später von Nieto-Hernandez et al. (2011) bestätigt werden. In anderen Veröffentlichungen zu diesem Themenkomplex, die nicht dem internationalen wissenschaftlichen Publikationsstandard entsprechen, wurden entweder ebenfalls keine (Butler, 2005; Neuschulz, 2012) oder nur sporadisch auftretende (Smith et al., 2005) Veränderungen im Leistungsverhalten bei unterschiedlichsten Testverfahren infolge einer TETRA-Exposition im Vergleich zu Sham berichtet.

Während bei einigen anderen EEG-basierten Untersuchungen aus dem TETRA-Forschungsprojekt ebenfalls keine nennenswerten unter Exposition beobachteten Abweichungen in den jeweiligen Zielparametern gefunden werden konnten (z.B. Verhältnis zwi-

schen der Alpha-Aktivität bei geöffneten und bei geschlossenen Augen, Amplituden und Latenzen von akustisch evozierten Potentialen), zeigten die Powerspektralwerte des Schlaf-EEGs Veränderungen unter der Exposition (Danker-Hopfe et al., 2014). Dieser Befund einer unter Exposition beobachteten Einflussnahme auf die Hirnaktivität im Schlaf steht zwar generell im Einklang mit den Ergebnissen aus der Mobilfunkforschung, allerdings waren beim TETRA-Forschungsprojekt im NREM-Schlaf eher Frequenzen im Beta-Bereich betroffen (Danker-Hopfe et al., 2014) und nicht, wie bisher relativ konsistent gefunden, im Schlafspindelfrequenzbereich (z.B. Borbely et al., 1999; Huber et al., 2000; Regel et al., 2007b). Der Vollständigkeit halber muss aber an dieser Stelle angemerkt werden, dass sich der Beta-Frequenzbereich (13 – 21,75 Hz) und das Spindelfrequenzband (12 – 15 Hz) teilweise überlappen. Ein ähnlich inkonsistentes Bild zeichnete sich auch für die Powerspektralwerte des Wach-EEGs ab. Während für diesen Endpunkt in Mobilfunkstudien relativ konsistent ein unter Exposition beobachteter Einfluss auf die Alpha-Aktivität beschrieben wurde (z.B. Croft et al., 2010; Vecchio et al., 2010; Vecchio et al., 2012), war der Alpha-Frequenzbereich im TETRA-Forschungsprojekt gar nicht von der Exposition betroffen. Stattdessen wurden unter Exposition frontozentral Abweichungen im Beta-Band und parietozentral Abweichungen im Delta-Band gefunden. Das Theta-Band wies zudem in verschiedenen Hirnregionen unter Exposition Veränderungen auf (Danker-Hopfe et al., 2015). Mögliche Effekte einer TETRA-Exposition auf die Hirnaktivität während eines Wach-EEGs sind auch im Rahmen des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms von Butler et al. (2005) überprüft worden. Die Auswertung der Daten ergab, dass im Vergleich zu Sham weder ein unmoduliertes noch ein nach dem TETRA-Standard moduliertes 400 MHz Trägersignal Veränderungen der untersuchten EEG-Frequenzbänder an verschiedensten Lokalisationen zur Folge hatte. Ein direkter Vergleich zwischen den Studien ist allerdings schwierig, da bei Butler et al. (2005) nur jeweils 40 Sekunden andauernde EEG-Abschnitte bei geöffneten und bei geschlossenen Augen analysiert wurden, während im TETRA-Forschungsprojekt ein fünfminütiger Abschnitt nur bei geschlossenen Augen für die Analyse herangezogen wurde. Außerdem unterschieden sich die beiden Studien auch deutlich in der Anzahl der Probanden.

Die Darstellung der einzelnen EEG-basierten Teilergebnisse aus dem TETRA-Forschungsprojekt hat gezeigt, dass nicht nur die Signalcharakteristiken des Mobilfunks, sondern auch die des TETRA-Funks zu leichten physiologischen Veränderungen der Hirnaktivität führen können. Ähnlich wie für den Mobilfunk scheinen sich aber auch diese EEG-Abweichungen im normalen physiologischen Bereich zu bewegen, weswegen sich daraus keine gesundheitliche Relevanz ableiten lässt. Ob allerdings alle Altersgruppen beider Geschlechter ähnlich auf HF-EMF reagieren, konnte bisher nicht zufrieden stellend beantwortet

werden. Aus diesem Grund ist es von großem wissenschaftlichem Interesse, der Ursache dieser Beobachtungen nachzugehen.

Im Folgenden soll deswegen noch einmal der eingangs erwähnte Vorgang der Demodulation aufgegriffen werden. Aus technischer Sicht wird unter dem Begriff Demodulation die Rückgewinnung eines (in Form von Schwankungen einer physikalischen Größe) dem Träger aufgeprägten, aus niedrigeren Frequenzen bestehenden Signals auf Seiten des Empfängers über ein nichtlineares elektronisches Element (Gleichrichter) verstanden (Gollnick et al., 2009). In biologischem Gewebe übernehmen die Zellmembranen den Part des Gleichrichters, über den die Abkopplung der Modulationskomponente vom HF-Signal erfolgen kann. Wie bereits im Zusammenhang mit den thermischen Auswirkungen erwähnt, werden HF-EMF von organischem Gewebe absorbiert und üben dabei Kräfte auf polare Strukturen aus, die dadurch in Schwingung versetzt werden. An Nervenzellmembranen kann dieser Vorgang dazu führen, dass mit jeder negativen Halbwelle positive Ionen in Richtung Zellinneres gedrückt werden, wodurch sich das Ruhemembranpotential schrittweise bis zur Erregungsschwelle erhöhen kann (Glaser und Haberland, 2009; Silny, 2004). Bei pulsmodulierten Signalen besteht der wirksame Reiz wegen ihrer Umhüllenden aus mehreren Halbwellen, woraus sich eine niedrigere Frequenz im Vergleich zum Trägersignal ergibt. Diese niedrigere Frequenz der Umhüllenden kann sich im Bereich der maximalen Empfindlichkeit einer Zelle befinden, woraus eine geringere Reizschwelle im Vergleich zum Trägersignal resultiert (Silny, 2004).

Als Beleg für elektrische Demodulationsvorgänge infolge einer Exposition werden häufig ältere Studien zum Kalzium-Stoffwechsel herangezogen. Die Ergebnisse dieser Studien deuteten darauf hin, dass eine HF-EMF-Befeldung von Hühnerhirngewebe mit einer amplitudenmodulierten Trägerfrequenz zu einer erhöhten Kalzium-Ionen-Freisetzung aus den Nervenzellen führt und dass dieser Effekt bei einer Amplitudenmodulation von 16 Hz am stärksten ausgeprägt war (Bawin et al., 1975; Blackman et al., 1979). Laut Bawin et al. (1975) waren die Beobachtungen aufgrund der zu geringen Sendeleistung nicht auf eine thermische Belastung zurückzuführen, sondern konnten eher damit erklärt werden, dass das modulierte HF-Signal im Gehirn gemäß seiner Modulationsfrequenz ein niederfrequentes elektrisches Feld erzeugt hatte, wodurch die Freisetzung von membrangebunden Kalziumionen beeinflusst wurde. Diese Arbeiten werden allerdings stark angezweifelt, u.a. wegen der Tatsache, dass die Ergebnisse von anderen Arbeitsgruppen nie repliziert werden konnten (z.B. Shelton und Merritt, 1981). Nichtsdestotrotz hat die *Independent Expert Group on Mobile Phones* (IEGMP) im Jahr 2000 eine Empfehlung ausgesprochen, Amplitudenmodulationsfrequenzen um 16 Hz wegen ihrer möglichen biologischen Wirksamkeit auf physiologische Hirnprozesse

für die Signalmodulation zu vermeiden (IEGMP, 2000). Seitdem wird die 17,6 Hz Modulationskomponente des TETRA-Funks mit großer Skepsis betrachtet. Doch auch aktuellere Studien haben Hinweise für eine besondere Wirkung der Pulsung von HF-EMF geliefert. Um den Einfluss der Pulsung eines GSM-Signals getrennt von einem thermischen Effekt auf die Hirnaktivität im Schlaf und im Wachzustand sowie auf den zerebralen Blutfluss bestimmen zu können, wurden in den Studien von Huber et al. (2000) und (2005) sowie von Regel et al. (2007a) neben einer Scheinbedingung pulsmodulierte und kontinuierliche Signale gleicher mittlerer Leistung verwendet. In diesen Studien zeigte sich, dass die Effekte nur infolge der Exposition mit dem pulsmodulierten Signal auftraten, woraus geschlossen wurde, dass die Pulsmodulation für die beobachteten Veränderungen verantwortlich sei.

Wie eben geschildert ist das Prinzip der Demodulation aus biophysikalischer Sicht prinzipiell möglich. Da aber die Existenz von an Zellmembranen stattfindenden Gleichrichteffekten für elektrische Wechselfelder experimentell nur bis zu einer Frequenz des HF-Trägersignals von einigen MHz nachgewiesen werden konnten (Silny, 2004), ist davon auszugehen, dass für Hochfrequenzamplituden unterhalb der Grenzwerte ein solcher Vorgang so gut wie nicht vorstellbar ist. Denn mit zunehmender Frequenz des HF-Signals nimmt die Amplitude der Schwingung von Ionen ab, und die Unsymmetrie der (elektro-)chemischen Vorgänge während positiver und negativer Halbwellen der HF-Schwingung wird so gering, dass praktisch keine wirksamen Verschiebungen von Membranpotentialen mehr auftreten. Die Halbwelldauer von Trägersignalen größerer Frequenz ist viel zu kurz bzw. der biologische Prozess für die Halbwelldauer ist viel zu langsam, als dass überhaupt noch eine Wechselwirkung stattfinden kann. Für den Mobilfunk beispielsweise beträgt die Dauer einer Halbwelle in etwa 10^{-9} s, Ionen brauchen aber ca. 10^{-3} s, um die Zellmembran zu passieren (Silny, 2004). Hinzukommt, dass die Wassermoleküle einen so starken dämpfenden Einfluss ausüben, dass die von außen sehr schwachen induzierten Feldkräfte z.B. eines HF-Signals des Mobilfunks nicht ausreichen, um Ionenflüsse künstlich umleiten, beschleunigen oder verlangsamen zu können (Gollnick et al., 2009). Damit die induzierten Kräfte von außen einen Einfluss auf die Ionenflüsse nehmen können, müsste die Intensität des Mobilfunksignals deutlich höher sein als momentan für den Kommunikationsfunk vorgesehen (Silny, 2004). Die direkte Reizung von Sinnesorganen, Nerven oder Muskeln durch eine Beeinflussung elektrischer Vorgänge an den Zellmembranen ist eine Wirkweise, die eher den niederfrequenten Feldern bzw. Gleichstromstimulationen zugesprochen wird. In einigen Studien wurde sich dieses Wirkprinzip zunutze gemacht, um schlaf- bzw. gedächtnisfördernde Effekte zu erzielen. So hatten Marshall et al. (2006) bei jüngeren Versuchspersonen mittels transkranieller Gleichstromstimulation versucht, ein von außen appliziertes langsam oszillierendes Signal mit den in der frühen Tiefschlafphase vorherrschenden langsamen Hirnwellen zu syn-

chronisieren, um somit einen positiven Effekt auf die schlafbezogene Gedächtniskonsolidierung zu erzielen. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die EEG-Power für den Frequenzbereich unterhalb 1 Hz nach der Verumstimulation im Vergleich zu Sham erhöht war und dass diese elektrophysiologische Beobachtung mit einer verbesserten Leistung in einem deklarativen Gedächtnistest einherging. Für ältere Personen konnte dieser gedächtnisfördernde Stimulationseffekt hingegen nicht bestätigt werden (Eggert et al., 2013).

Aufgrund der Tatsache, dass ein direktes Einwirken von HF-EMF auf die Hirnaktivität biophysikalisch betrachtet mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden kann, bleibt die Frage weiterhin offen, wie die leichten physiologischen Effekte im EEG begründet werden können. Entsprechend muss überlegt werden, ob nicht auch schon bei HF-Expositionen unterhalb der Grenzwerte thermische Wirkungen auftreten können. Kürzlich wurde dieser Erklärungsansatz von Danker-Hopfe et al. (2016) zur Interpretation von makrostrukturellen Veränderungen des REM-Schlafes unter Exposition mit HF-EMF von Mobiltelefonen herangezogen. Die Hypothese basiert darauf, dass die gleichen warmsensitiven Neurone im *Nucleus preopticus* des Hypothalamus, die während des REM-Schlafes aktiv sind, auch an der Thermoregulation beteiligt sind. In einer Studie, die der Überprüfung diese Verknüpfung nachging, konnte beispielsweise dargelegt werden, dass eine distale Erwärmung der Haut von ca. 0,4 °C bei nahezu unveränderter Körperkerntemperatur zu einem signifikanten Anstieg des REM-Schlafes bei jungen und älteren Probanden führte (Raymann et al., 2008). Entsprechend wurde von Danker-Hopfe et al. (2016) vermutet, dass die Zunahme des REM-Schlafes durch eine infolge der HF-Exposition verursachte Hauttemperaturerhöhung bedingt war. Um diese Hypothese jedoch zu überprüfen, müsste bei zukünftigen Studien das Expositionsprotokoll um eine weitere Sham-Bedingung, aus der nur eine vergleichbare Erwärmung resultiert, erweitert werden.

3.3. METHODISCHE STÄRKEN UND SCHWÄCHEN

In Kapitel 1.2. wurde bereits erwähnt, dass bei den Teiluntersuchungen die von Regel und Achermann (2011) publizierten Vorschläge zur Durchführung von EMF-Studien, die die Überprüfung eines Einflusses auf kognitive Leistungen zum Ziel haben, im Wesentlichen berücksichtigt wurden. Bei den drei Teiluntersuchungen handelte es sich um randomisierte cross-over Studien, die zudem placebokontrolliert waren und doppelblind durchgeführt wurden. Da jede Expositionsbedingung pro Versuchsperson dreimal vorgesehen war, konnte für jeden Zielparameter ein robuster Schätzer ermittelt werden. Dieses Vorgehen ist besonders bei ereignisbezogenen Hirnaktivitäten für das Erzielen eines verbesserten Signal-zu-Rausch-

Verhältnisses hilfreich. Wird allerdings jede Expositionsbedingung getrennt betrachtet, ermöglicht diese Versuchsdurchführung auch eine statistische Analyse auf der individuellen Ebene, wie sie bei Danker-Hopfe et al. (2016) erfolgt ist.

In den Teiluntersuchungen wurde außerdem versucht, mögliche expositionsunabhängige Einflussfaktoren zu minimieren. So wurde neben dem bereits angesprochenen Tageszeitpunkt für die Durchführung der Testbatterie auch noch über die gesamte Dauer der Studie das Schlaf-Wach-Verhalten der Teilnehmer mittels Aktigraphie kontrolliert, wobei hier besonders die Schlafdauer in der Nacht vor einer Testbedingung von Interesse war. Ebenso wurde vor Beginn jeder Testbedingung der Alkoholgehalt in der Atemluft überprüft und es wurde darauf geachtet, dass sowohl die Lichtverhältnisse als auch die klimatischen Bedingungen im Testraum konstant gehalten wurden.

Die Stichprobengröße von 30 Probanden ermöglichte es, einen Effekt mittlerer Größe mit einer ausreichenden statistischen Power absichern zu können. Bei der Auswahl der Probanden wurden strenge Teilnahmebedingungen festgelegt, was dazu führte, dass insgesamt 144 Personen kontaktiert werden mussten. Dadurch konnte aber sichergestellt werden, dass die Gruppe der Studienteilnehmer sehr homogen war und somit mögliche Expositionseffekte nicht durch individuelle Variationen, die sich aufgrund unberücksichtigter expositionsunabhängiger Einflussfaktoren ergeben würden, maskiert wurden. Die Tatsache, dass nur junge, gesunde Männer zwischen 18 und 30 Jahren untersucht wurden, kann aber auch als Nachteil angesehen werden, da die Ergebnisse nur bedingt verallgemeinerbar auf die Allgemeinbevölkerung (Frauen, Kinder und ältere Menschen) sind.

Bei der Auswahl der Tests, die am Nachmittag während einer Tagesuntersuchung von den Probanden absolviert werden mussten, wurde darauf geachtet, dass die kognitive Beanspruchung über die Testbatterie hinweg zunahm, die Dauer der einzelnen Tests sowie die jeweiligen Testanforderungen innerhalb der Testbatterie aber leicht variierte, um möglichen Müdigkeitserscheinungen und/oder Motivationsverlusten vorzubeugen. Die Reihenfolge der Tests wurde dabei immer konstant gehalten. Es wurde versucht, die Tagesuntersuchungen jedes Mal gegen 16:00 Uhr an einem für die Probanden individuellen Wochentag durchzuführen, um tageszeit- und wochentagbedingte Unterschiede in den Testleistungen zu kontrollieren. Damit der Einfluss eines möglichen Lerneffektes in den Testleistungen so gering wie möglich gehalten wurde, war die erste Tagesuntersuchung zum Üben der Tests vorgesehen. Andererseits kann allerdings nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass Müdigkeitserscheinungen und/oder Motivationsverluste einen Einfluss auf die Ergebnisse gehabt haben, da die Testbatterie mit einer Gesamtdauer von zwei Stunden sehr lang war.

Wie ebenfalls in Kapitel 1.2. erwähnt, entsprach der in den Teiluntersuchungen verwendete Expositionsaufbau ebenfalls im Wesentlichen den empfohlenen Standards für EMF-Studien (Kuster et al., 2004). Sicherlich wäre es in Anlehnung an diese Empfehlungen zur besseren Aufklärung der beobachteten Effekte dienlich gewesen, das bestehende Expositionsprotokoll zusätzlich um eine weitere Sham-Bedingung, aus der nur eine vergleichbare Erwärmung resultiert, und um ein kontinuierliches TETRA-Expositionssignal zu erweitern. Andernfalls wäre ein cross-over Studiendesign mit fünf Bedingungen und drei Wiederholungen pro Bedingung für jeden Probanden eine sehr große Belastung gewesen, was wiederum ebenfalls die Durchführbarkeit der Studie hätte beeinflussen können.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die hier präsentierten Ergebnisse zu einer möglichen akuten Einflussnahme einer Exposition mit TETRA-Endgerätsignalen auf das ZNS haben gezeigt, dass auf Verhaltensebene keine nennenswerten Effekte zu erwarten sind. In den EEG-basierten Untersuchungen konnten entweder keine (LP) oder teils zum Mobilfunk widersprüchliche (Wach- und Schlaf-EEG) Effekte gefunden werden. Auch wenn für den TETRA-Funk ebenfalls leichte physiologische EEG-Veränderungen festgestellt werden konnten, lassen sich daraus aufgrund der inkonsistenten Resultate im Vergleich zum Mobilfunk und wegen der nicht abschließend geklärten Gesundheitsrelevanz dieser Beobachtungen keine Hinweise für eine Ursache ableiten. Entsprechend unterstützen die hier präsentierten Ergebnisse die Aussage von Sheppard et al. (2008), dass der einzige wissenschaftlich gesicherte Wirkmechanismus von HF-EMF ein thermischer Effekt ist. Im Sinne des Strahlenschutzes kann festgehalten werden, dass die hier präsentierten Ergebnisse keine Evidenz für eine gesundheitsschädigende Wirkung von HF-EMF im Allgemeinen und von der Signalcharakteristik des TETRA-Funks im Speziellen liefern. In diesem Zusammenhang muss aber erwähnt werden, dass die Ergebnisse ausschließlich für junge männliche Probanden gelten und sich auf die Gruppenebene beziehen. Ob möglicherweise einzelne Individuen stärker als andere betroffen sein können oder die möglichen Effekte mit dem Alter und/oder Geschlecht variieren, kann mit dieser Arbeit nicht beantwortet werden.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- AGNIR (2001): Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Documents of the NRPB., Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation, 12, 2
- AGNIR (2012): Health Effects from Radiofrequency Electromagnetic Fields., Documents of the Health Protection Agency - Radiation, Chemical and Environmental Hazards., Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation, RCE-20
- Anderson, V. und Rowley, J. (2007): Measurements of skin surface temperature during mobile phone use, *Bioelectromagnetics* (Band 28), Nr. 2, Seite 159-162.
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K. und Adey, W. R. (1975): Effects of modulated VHF fields on the central nervous system, *Annals of the New York Academy of Sciences* (Band 247), Seite 74-81.
- BfS (2008): Ergebnisse des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms (DMF), Bewertung der gesundheitlichen Risiken des Mobilfunks, Bundesamt für Strahlenschutz
- Birbaumer, N.; Elbert, T.; Canavan, A. G. und Rockstroh, B. (1990): Slow potentials of the cerebral cortex and behavior, *Physiological reviews* (Band 70), Nr. 1, Seite 1-41.
- Birbaumer, N. und Schmidt, R.F. (2006): *Biologische Psychologie*, 6. Ausgabe. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C. und House, D. E. (1979): Induction of Calcium-Ion Efflux from Brain-Tissue by Radio-Frequency Radiation - Effects of Modulation Frequency and Field-Strength, *Radio Science* (Band 14), Seite 93-98.
- Blick, D. W.; Adair, E. R.; Hurt, W. D.; Sherry, C. J.; Walters, T. J. und Merritt, J. H. (1997): Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin, *Bioelectromagnetics* (Band 18), Nr. 6, Seite 403-9.
- BMU (2012): *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung - Jahresbericht 2010*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- BnetzA (2015): *Jahresbericht 2014 - Netze ausbauen. Zukunft sichern. Infrastrukturausbau in Deutschland.*, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
- Bolz, T. ; Bahr, A. und Schmid, G. (2010): Abschlussbericht zum Aufbau einer Expositionseinrichtung im Rahmen des Forschungsvorhabens FM8846 „Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen“. IMST GmbH, 47475 Kamp Lintfort und Seibersdorf Laboratories, 2444 Seibersdorf.
- Borbely, A. A.; Huber, R.; Graf, T.; Fuchs, B.; Gallmann, E. und Achermann, P. (1999): Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram, *Neuroscience letters* (Band 275), Nr. 3, Seite 207-10.
- Butler, S. (2005): *Detection of Effects of Microwave Radiation on the Electrical Activity of the Brain.*, Bristol, UK, Mobile Telecommunications and Health Research Programme, 20 October 2014, Project RUM 21. July 2005., URL: http://www.mthr.org.uk/research_projects/home_office_funded_projects/documents/RUM21FinalReport.pdf [Stand: 29.03.2016]
- Croft, R. J.; Leung, S.; McKenzie, R. J.; Loughran, S. P.; Iskra, S.; Hamblin, D. L. und Cooper, N. R. (2010): Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly, *Bioelectromagnetics* (Band 31), Nr. 6, Seite 434-44.
- Danker-Hopfe, H. und Dorn, H. (2007): Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen, URL: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_abges/bio_080_AB.pdf [Stand: 29.03.2016]
-

-
- Danker-Hopfe, H. und Dorn, H. (2008): Untersuchung der Schlafqualität bei Anwohnern einer Basisstation – Experimentelle Studie zur Objektivierung möglicher psychologischer und physiologischer Effekte unter häuslichen Bedingungen, URL: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_abges/bio_095_AB.pdf [Stand: 29.03.2016]
- Danker-Hopfe, H.; Dorn, H.; Bahr, A.; Anderer, P. und Sauter, C. (2011): Effects of electromagnetic fields emitted by mobile phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep, *Journal of Sleep Research* (Band 20), Nr. 1 Pt 1, Seite 73-81.
- Danker-Hopfe, H.; Dorn, H.; Bolz, T.; Peter, A.; Hansen, M. L.; Eggert, T. und Sauter, C. (2016): Effects of mobile phone exposure (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on polysomnography based sleep quality: An intra- and inter-individual perspective, *Environmental research* (Band 145), Seite 50-60.
- Danker-Hopfe, H.; Dorn, H.; Bornkessel, C. und Sauter, C. (2010): Do mobile phone base stations affect sleep of residents? Results from an experimental double-blind sham-controlled field study, *American journal of human biology : the official journal of the Human Biology Council* (Band 22), Nr. 5, Seite 613-8.
- Danker-Hopfe, H.; Dorn, H.; Sauter, C. und Eggert, T. (2014): Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen - Vorhaben FM8846, URL: https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2014090311644/3/BfS_2014_FM8846.pdf [Stand: 29.03.2016]
- Danker-Hopfe, H.; Sauter, C.; Eggert, T.; Schmid, G.; Bolz, T. und Dorn, H. (2015): Does TETRA exposure affect the power spectra of the resting state EEG?, *BioEM2015* 14-19 June, Asilomar, California USA
- Dimbylow, P.; Khalid, M. und Mann, S. (2003): Assessment of specific energy absorption rate (SAR) in the head from a TETRA handset, *Physics in medicine and biology* (Band 48), Nr. 23, Seite 3911-26.
- EC (2010): Special Eurobarometer 347 - Electromagnetic Fields., Conducted by TNS Opinion & Social at the request of Directorate General for Health and Consumer Affairs, Bruxelles, European Commission, Wave 73.3, URL: http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_347_en.pdf [Stand: 29.03.2016]
- Eggert, T.; Dorn, H.; Sauter, C.; Nitsche, M. A.; Bajbouj, M. und Danker-Hopfe, H. (2013): No effects of slow oscillatory transcranial direct current stimulation (tDCS) on sleep-dependent memory consolidation in healthy elderly subjects, *Brain stimulation* (Band 6), Nr. 6, Seite 938-45.
- Freude, G.; Ullsperger, P.; Eggert, S. und Ruppe, I. (1998): Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials, *Bioelectromagnetics* (Band 19), Nr. 6, Seite 384-7.
- Freude, G.; Ullsperger, P.; Eggert, S. und Ruppe, I. (2000): Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials, *European journal of applied physiology* (Band 81), Nr. 1-2, Seite 18-27.
- Glaser, G. und Haberland, L. (2009): Welche Demodulationsmechanismen hochfrequenter Felder in biologischen Systemen sind bekannt, Friedrich, G., *Gepulste Felder - eine besondere Gefahr für die Gesundheit?* Seite 67-69, BG Elektro Textil Feinmechanik/Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Köln/Bonn.
- Gollnick, F.; Haberland, L. und Michaelis, W. (2009): Modulation und Demodulation in der Nachrichtentechnik, Friedrich, G., *Gepulste Felder - eine besondere Gefahr für die Gesundheit?* Seite 14-19, BG Elektro Textil Feinmechanik/Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Köln/Bonn.
- Hendler, E. und Hardy, J. D. (1960): Infrared and microwave effects on skin heating and temperature sensation, *IRE transactions on medical electronics* (Band ME-7), Seite 143-52.
-

-
- Huber, R.; Graf, T.; Cote, K. A.; Wittmann, L.; Gallmann, E.; Matter, D.; Schuderer, J.; Kuster, N.; Borbely, A. A. und Achermann, P. (2000): Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG, *Neuroreport* (Band 11), Nr. 15, Seite 3321-5.
- Huber, R.; Treyer, V.; Schuderer, J.; Berthold, T.; Buck, A.; Kuster, N.; Landolt, H. P. und Achermann, P. (2005): Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow, *The European journal of neuroscience* (Band 21), Nr. 4, Seite 1000-6.
- ICNIRP (1998): Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Health Physics* (Band 74), Seite 494-522.
- IEGMP (2000): Mobile Phones and Health., The Stewart Report, Independent Expert Group on Mobile Phones
- Infas (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
- Infas (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
- Infas (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
- Infas (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
- Infas (2009): Ermittlung der Befürchtungen und Ängste der breiten Öffentlichkeit hinsichtlich möglicher Gefahren der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks – Vorhaben 3609S80001, - Abschlussbericht über die Befragung im Jahr 2009 -, Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH
- Kuster, N.; Schuderer, J.; Christ, A.; Futter, P. und Ebert, S. (2004): Guidance for exposure design of human studies addressing health risk evaluations of mobile phones, *Bioelectromagnetics* (Band 25), Nr. 7, Seite 524-9.
- Linde, C. (2008): Aufbau und Technik des digitalen BOS-Funks, Franzis Verlag GmbH, Poing.
- LINK (2013): Differenzierte Betrachtung der Nutzung und der Wahrnehmung des Mobilfunks - Vorhaben FM8854, LINK Institut für Markt- und Sozialforschung GmbH
- Loughran, S. P.; McKenzie, R. J.; Jackson, M. L.; Howard, M. E. und Croft, R. J. (2012): Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem, *Bioelectromagnetics* (Band 33), Nr. 1, Seite 86-93.
- Lowden, A.; Akerstedt, T.; Ingre, M.; Wiholm, C.; Hillert, L.; Kuster, N.; Nilsson, J. P. und Arnetz, B. (2011): Sleep after mobile phone exposure in subjects with mobile phone-related symptoms, *Bioelectromagnetics* (Band 32), Nr. 1, Seite 4-14.
- LUBW/LfU (2010): Elektromagnetische Felder im Alltag, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg/ Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Marshall, L.; Helgadottir, H.; Mölle, M. und Born, J. (2006): Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory, *Nature* (Band 444), Nr. 7119, Seite 610-3.
- Müller, W. (2004): Tier- und Humanphysiologie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Neuschulz, H. (2012): Einfluss eines TETRA-Feldes auf kognitive Funktionen und Reaktionen in einer Ruhesituation, *EMF Spectrum* (Band 3), Seite 13-17.
-

-
- Nieto-Hernandez, R.; Williams, J.; Cleare, A. J.; Landau, S.; Wessely, S. und Rubin, G. J. (2011): Can exposure to a terrestrial trunked radio (TETRA)-like signal cause symptoms? A randomised double-blind provocation study, *Occupational and environmental medicine* (Band 68), Nr. 5, Seite 339-44.
- Raymann, R. J.; Swaab, D. F. und Van Someren, E. J. (2008): Skin deep: enhanced sleep depth by cutaneous temperature manipulation, *Brain : a journal of neurology* (Band 131), Nr. Pt 2, Seite 500-13.
- Regel, S. J. und Achermann, P. (2011): Cognitive performance measures in bioelectromagnetic research - critical evaluation and recommendations, *Environmental health : a global access science source* (Band 10(10)), Nr. 1.
- Regel, S. J.; Gottselig, J. M.; Schuderer, J.; Tinguely, G.; Retey, J. V.; Kuster, N.; Landolt, H. P. und Achermann, P. (2007a): Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram, *Neuroreport* (Band 18), Nr. 8, Seite 803-7.
- Regel, S. J.; Tinguely, G.; Schuderer, J.; Adam, M.; Kuster, N.; Landolt, H. P. und Achermann, P. (2007b): Pulsed radio-frequency electromagnetic fields: dose-dependent effects on sleep, the sleep EEG and cognitive performance, *Journal of Sleep Research* (Band 16), Nr. 3, Seite 253-8.
- Riddervold, I. S.; Kjaergaard, S. K.; Pedersen, G. F.; Andersen, N. T.; Franek, O.; Pedersen, A. D.; Sigsgaard, T.; Zachariae, R.; Molhave, L. und Andersen, J. B. (2010): No effect of TETRA hand portable transmission signals on human cognitive function and symptoms, *Bioelectromagnetics* (Band 31), Nr. 5, Seite 380-90.
- Sauter, C.; Dorn, H.; Bahr, A.; Hansen, M. L.; Peter, A.; Bajbouj, M. und Danker-Hopfe, H. (2011): Effects of exposure to electromagnetic fields emitted by GSM 900 and WCDMA mobile phones on cognitive function in young male subjects, *Bioelectromagnetics* (Band 32), Nr. 3, Seite 179-90.
- Sauter, C.; Dorn, H.; Eggert, T. und Danker-Hopfe, H. (2010): Überprüfung der Wärmewahrnehmung im Rahmen der Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen
- SCENIHR (2015): Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
- Schmid, G.; Bolz, T.; Überbacher, R.; Escorihuela-Navarro, A.; Bahr, A.; Dorn, H.; Sauter, C.; Eggert, T. und Danker-Hopfe, H. (2012a): Design and dosimetric analysis of a 385 MHz TETRA head exposure system for use in human provocation studies, *Bioelectromagnetics* (Band 33), Nr. 7, Seite 594-603.
- Schmid, G.; Überbacher, R.; Preiner, P.; Samaras, T.; Mazal, P.; Jappel, A.; Baumgartner, W-D. und Tschabitscher, M. (2008): Bestimmung der Expositionsverteilung von HF Feldern im menschlichen Körper, unter Berücksichtigung kleiner Strukturen und thermophysiological relevanter Parameter., URL: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_040_AB.pdf [Stand: 29.03.2016]
- Schmid, M. R.; Loughran, S. P.; Regel, S. J.; Murbach, M.; Bratic Grunauer, A.; Rusterholz, T.; Bersagliere, A.; Kuster, N. und Achermann, P. (2012b): Sleep EEG alterations: effects of different pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields, *Journal of sleep research* (Band 21), Nr. 1, Seite 50-8.
- Schmidt, R.F.; Lang, F. und Heckmann, M. (2011): *Physiologie des Menschen - mit Pathophysiologie*, 31. Ausgabe. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Shelton, W. W., Jr. und Merritt, J. H. (1981): In vitro study of microwave effects on calcium efflux in rat brain tissue, *Bioelectromagnetics* (Band 2), Nr. 2, Seite 161-7.
- Sheppard, A. R.; Swicord, M. L. und Balzano, Q. (2008): Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes, *Health Physics* (Band 95), Nr. 4, Seite 365-96.
-

-
- Silny, J. (2004): Gepulste Funkwellen. Wirkungsmechanismen niederfrequent gepulster Mikrowellen im Organismus, Informationsschrift im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- Smith, RN. ; Tattersall, JEH. ; Bowditch, SC.; Holden, SJ.; Green, AC.; Scott, IR.; Harrison, PK.; Low, DA.; Smith, SJR.; Grose, RI. und Mifsud, NCD. (2005): An Investigation of the Effects of the Airwave TETRA Signal on Cellular Calcium and Brain Function, Dstl/CR15728 Issue 1.0. September 2005, Biomedical Sciences, Dstl Porton Down. Salisbury
- SSK (2011): Biologische Auswirkungen des Mobilfunks - Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, Strahlenschutzkommission
- Straume, A.; Oftedal, G. und Johnsson, A. (2005): Skin temperature increase caused by a mobile phone: A methodological infrared camera study, Bioelectromagnetics (Band 26), Nr. 6, Seite 510-519.
- UNEP/WHO/IRPA (1993): Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz), Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 137, United Nations Environment Programme/ World Health Organization/ International Radiation Protection Association, URL: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm> [Stand: 29.03.2016]
- Vecchio, F.; Babiloni, C.; Ferreri, F.; Buffo, P.; Cibelli, G.; Curcio, G.; van Dijkman, S.; Melgari, J. M.; Giambattistelli, F. und Rossini, P. M. (2010): Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects, Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology (Band 121), Nr. 2, Seite 163-71.
- Vecchio, F.; Buffo, P.; Sergio, S.; Iacoviello, D.; Rossini, P. M. und Babiloni, C. (2012): Mobile phone emission modulates event-related desynchronization of alpha rhythms and cognitive-motor performance in healthy humans, Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology (Band 123), Nr. 1, Seite 121-8.
- Veyret, B. und Perrin, A. (2012): Wireless Communications and Radiofrequency Fields, Perrin, A. und Souques, M., Electromagnetic Fields, Environment and Health Seite 63-79, Springer-Verlag, Paris.
- Weeß, H.-G.; Lund, R.; Gresele, C.; Böhning, W.; Sauter, C. und Steinberg, R. (1998): Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schläfrigkeit. Die Messung müdigkeitsbezogener Prozesse bei Hypersomnien., Somnologie (Band 2), Seite 32-41.
- WHO (2010): Research Agenda for Radiofrequency Fields, World Health Organisation, URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/en/> [Stand: 29.03.2016]

6. ANHANG

6.1. DANKSAGUNG

Die hier vorliegende Dissertation entstand am Kompetenzzentrum Schlafmedizin der Klinik und Hochschulambulanz für Psychiatrie und Psychotherapie der Charité - Campus Benjamin Franklin, welches von Frau Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe geleitet wird.

Frau Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe möchte ich an dieser Stelle besonders für die Möglichkeit danken, in ihrer Arbeitsgruppe seit nun mehr als sechs Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig sein zu können und dass mir im Rahmen dieser Arbeit dieses Promotions-thema zur Verfügung gestellt wurde. Über die gesamte Zeit hinweg hat sich mich stets gefördert und mir immer Unterstützung angeboten, wenn Hilfe benötigt wurde. Dafür möchte ich mich noch einmal recht herzlich bedanken.

Ich möchte auch Frau Prof. Dr. Ursula Koch vom Institut für Biologie der FU Berlin, Arbeitsbereich Neurobiologie und Verhalten, für die Bereitschaft danken, die Zweitbegutachtung dieser Dissertation übernommen zu haben.

Auch möchte ich allen Mitarbeitern des Kompetenzzentrums Schlafmedizin und allen studentischen Hilfskräften, die mit mir zusammen in diesem Forschungsprojekt gearbeitet haben, meinen Dank für ihr engagiertes Mitwirken an der Studie aussprechen.

Meinen Eltern und meinem Bruder möchte ich ganz herzlich danken, dass sie trotz einiger schwieriger Phasen immer an mich geglaubt haben und während des gesamten Zeitraums moralisch an meiner Seite standen.

Ein besonderer Dank geht an meine Lebensgefährtin Nadine und an meinen Sohn Jonathan, die mich während des gesamten Zeitraums unheimlich liebevoll unterstützt haben und mir somit die Kraft gaben, die ich benötigt habe, um diesen Weg bis zum Schluss bestreiten zu können.

6.2. CURRICULUM VITAE

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten

6.3. WEITERE PUBLIKATIONEN

6.3.1. THEMENVERWANDTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Schmid G, Bolz T, Überbacher R, Escorihuela-Navarro A, Bahr A, Dorn H, Sauter C, Eggert T, Danker-Hopfe H (2012). *Design and Dosimetric Analysis of a 385 MHz TETRA Head Exposure System for Use in Human Provocation Studies*. Bioelectromagnetics; 33(7): 594-603. DOI: [10.1002/bem.21727](https://doi.org/10.1002/bem.21727)

Danker-Hopfe H, Eggert T, Sauter C, Schmid G, Bolz T, Dorn H (2012). *Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der TETRA-Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen*. EMF Spectrum; 3 :8-12. ISSN: 2190-9393

Danker-Hopfe H, Dorn H, Bolz T, Peter A, Hansen ML, 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*. Environmental Research; 145: 50-60. DOI: [10.1016/j.envres.2015.11.011](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.11.011)

6.3.2. VERÖFFENTLICHUNG ZU ANDEREN THEMENBEREICHEN

Eggert T, Sauter C, Popp R, Zeitlhofer J, Danker-Hopfe H on behalf of the working group “Vigilance” of the German Society for Sleep Research and Sleep Medicine (DGSM) (2016). *The Pupillographic Sleepiness Test in adults: effect of age, gender, and time of day on pupillometric variables*. American Journal of Human Biology; 24(6): 820-828. DOI: [10.1002/ajhb.22326](https://doi.org/10.1002/ajhb.22326)

Eggert T, Dorn H, Sauter C, Nitsche MA, Bajbouj M, Danker-Hopfe H (2013). *No effects of slow oscillatory transcranial direct current stimulation (tDCS) on sleep-dependent memory consolidation in healthy elderly subjects*. Brain Stimulation; 6(6): 938-945. DOI: [10.1016/j.brs.2013.05.006](https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.05.006)

Eggert T, Sauter C, Dorn H, Peter A, Hansen ML, Marasanov A, Danker-Hopfe H (2015). *Individual stability of sleep spindle characteristics in healthy young males*. Somnologie; 19(1): 38-45; DOI: [10.1007/s11818-015-0697-x](https://doi.org/10.1007/s11818-015-0697-x)

6.4. EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die im Text angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe. Die vorliegende Dissertation wurde nur in diesem Promotionsverfahren eingereicht und war auch nie Prüfungsleistung in einem vorausgegangenen Promotionsverfahren.

Ort, Datum

Unterschrift
