

Handy-Chips reduzieren erhöhte EEG-Gehirnaktivitäten, die durch die ausgesendeten elektromagnetischen Felder von Mobiltelefonen verursacht werden

Diana Henz^{1*}, Wolfgang I. Schöllhorn¹ und Burkhard Poeggeler²

¹ Institut für Sportwissenschaft der Johannes-Gutenberg Universität in Mainz, Deutschland,

² Johann-Friedrich-Blumenbach-Institut für Zoologie und Anthropologie, Fakultät für Biologie und Psychologie, Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

Aktuelle neurophysiologische Studien zeigen, dass eine Exposition durch elektromagnetische Felder (EMF) Auswirkungen auf die Gehirnaktivität haben kann, die durch die Strahlung von Mobiltelefonen erzeugt werden. Für eine technische Lösung stehen Handy-Chips zur Verfügung, um die Wirkungen von EMF bei der Nutzung von Mobiltelefonen zu reduzieren. Sie werden an den Mobiltelefonen oder auf deren Oberflächen angebracht. Bis heute gibt es keine systematischen Studien über die Auswirkungen auf die Gehirnaktivität und deren zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen bei der Nutzung von Handy-Chips. In der vorliegenden Laborstudie wurde untersucht, inwiefern die auf den Mobiltelefonen angebrachten Handy-Chips die Auswirkungen von EMFs reduzieren können, die durch die Strahlungen des Mobiltelefons auf die Gehirnaktivität des Elektroenzephalogramms (EEG) emittiert werden. Dreißig Teilnehmer nahmen an der vorliegenden Studie teil. Für die betroffenen Versuchspersonen wurden die Versuchsbedingungen (Handy-Chip, Placebo-Chip, Ohne-Chip) nach einem randomisierten Schema festgelegt. Für zwei Sequenzen von jeweils 2 Minuten wurde ein spontanes EEG im Ruhezustand vor und nach der Handy-Exposition aufgezeichnet. Das spontane EEG wurde für 30 Minuten im Ruhezustand und für 5 Minuten bei der Durchführung eines Aufmerksamkeitstests (d2-R) während einer Mobiltelefonexposition aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigten eine erhöhte Aktivität in den Theta-, Alpha-, Beta- und Gamma-Frequenzbändern während der EMF-Exposition unter der Voraussetzung einer Anwendung mit dem Placebo-Chip und in einer experimentellen Bedingung ohne Chip. Die Applikation des Handy-Chips reduzierte signifikant die Auswirkungen der EMF auf die EEG-Gehirnaktivität und auf die Aufmerksamkeitsleistung. Das Leistungsniveau der Aufmerksamkeit wurde bezüglich der Anzahl der zu bearbeitenden Zeichen beibehalten. Unter den Voraussetzungen eines applizierten Handy-Chips brachte außerdem eine Dipol-Analyse unterschiedliche zugrundeliegende Aktivierungsmuster zum Vorschein im Vergleich zu den Voraussetzungen einer Applikation mit Placebo-Chip und ohne Chipanwendung. Schließlich zeigte eine Korrelationsanalyse für die EEG-Frequenzbänder und die Emission elektromagnetischer Hochfrequenz (HF) signifikante Korrelationen für die Frequenzbänder Theta-, Alpha-, Beta- und Gamma bei Applikation des Placebo-Chip und ohne Chip-Applikation. Eine signifikante Korrelation von HF mit den Frequenzbändern im Theta- und Alphabereich, nicht jedoch mit dem Beta- und Gammabereich zeigte sich unter der Anwendung eines Handy-Chips. Wir nehmen an, dass eine reduzierte Aktivierung von EEG-Beta und -Gammawellen der Schlüsselmechanismus bei der Nutzung von Chips für Mobiltelefone darstellt, der das Gehirn bei der Aufrechterhaltung seiner natürlichen Aktivität und seines Leistungsniveaus während der Nutzung von Mobiltelefonen unterstützt.

Schlüsselwörter: Handy-Strahlung, Handy-Chips, Elektroenzephalographie, Elektromagnetische Feldexposition, Aufmerksamkeit

OPEN-ACCES

Herausgegeben von:

Shaïda A. Andrabi
Universität von Alabama in Birmingham,
Die Vereinigten Staaten von Amerika

Begutachtet durch:

Fahmeed Hyder,
Yale Universität,
USA
Avital Schurr,
Universität in Louisville,
USA

Korrespondenz:

Diana Henz
henz@uni-mainz.de

Spezifischer Fachbereich:

Dieser Artikel wurde eingereicht bei
"Neuroenergetics, Nutrition and Brain
Health",
ein Abschnitt in der Fachzeitschrift
"Frontiers in Neuroscience"

Eingang: 08 September 2017

Anerkannt: 08 März 2018

Veröffentlicht: 04 April 2018

Quellenangaben:

Henz D, Schöllhorn WI und
Poeggeler B (2018) "Mobile Phone
Chips Reduce Increases in EEG Brain
Activity Induced by Mobile
Phone-Emitted Electromagnetic
Fields." *Front. Neurosci.* 12:190.
doi: 10.3389/fnins.2018.00190

EINLEITUNG

Neurophysiologische Studien zeigen, dass die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF), die durch die Strahlung von Mobiltelefonen erzeugt werden, Auswirkungen auf die Gehirnaktivität haben kann. Für alle Frequenzbänder des EEG (Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma) wurden die Veränderungen im menschlichen EEG dokumentiert, die durch emittierte EMFs der Mobiltelefone verursacht wurden. In einer Doppelblindstudie mit 72 Probanden, die 20 Minuten lang EMF ausgesetzt waren, zeigte sich ein Einfluss auf die Alpha-Aktivität im Ausgangszustand. Die Alpha-Aktivität war bei einer EMF-Exposition signifikant reduziert (Perentos et al., 2013). Zwei Studien von Hinrikus et al. (2008) und Suhova et al. (2013) zeigten einen Anstieg der Beta-1- und Beta-2-Aktivität, und im Gegensatz zu einer Studie von Perentos et al. (2013) wurde ein Anstieg der Alpha-Aktivität nach EMF-Exposition beobachtet. Mehrere Studien haben einen Anstieg der Alpha-1- und Alpha-2-Aktivität in den Non-REM Schlafstadien unter EMF-Exposition gezeigt (Borbély et al., 1999; Huber et al., 2000). Schlafabhängige Lernprozesse wie die Optimierung motorischer Fähigkeiten können durch EMF-Exposition negativ beeinflusst werden. Eine signifikante Reduktion der motorischen Fähigkeiten nach einer Nacht unter EMF-Exposition wurde im Vergleich zur Kontrollgruppe dokumentiert (Lustenberger et al., 2013). Reduzierte synaptische Plastizität und damit eine eingeschränkte Konsolidierung durch die Verlagerung der Gehirnaktivität wurden als mögliche Mediatoren für diese negativen Auswirkungen der EMF-Exposition während des Schlafes diskutiert. Neuere Studien haben die Auswirkungen der EMF-Exposition auf kognitive Funktionen untersucht. Zum Beispiel kann eine EMF-Exposition über 20 Minuten das räumliche Gedächtnis bei Ratten beeinträchtigen (Jadidi et al., 2007). Bei EMF-exponierten Mäusen zeigten sich vergleichbare Ergebnisse bei den Defiziten in der Verarbeitung von räumlichen Erinnerungen (Sienkiewicz et al., 1998). Um die zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen der Auswirkungen von EMF-Exposition auf die Defizite in der Gehirnfunktion zu erklären, zeigten Studien, dass EMF-Exposition zu Verhaltensänderungen, Neurotransmitterfreisetzungen und einer erhöhten Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke führen kann (Kaviani Mogadam et al., 2004; Luo et al., 2016). Außerdem zeigen Untersuchungen, dass EMF-Expositionen oxidativen Stress im Hippocampus und Striatum verursachen können, was möglicherweise Störungen im räumlichen Lernen erklären könnte, die mit dem Hippocampus in Zusammenhang stehen (Cui et al., 2012). Veränderungen in den EEG-Theta- und Gamma-Frequenzbändern korrelierten mit den durch EMF verursachten Defiziten im Arbeitsgedächtnis (Zhang et al., 2017).

Neurologische und psychiatrische Störungen können auch durch EMF-Exposition verschlimmert werden. Neuere Forschungen zeigen Zusammenhänge zwischen EMF-Exposition und Schlafstörungen, Schlaflosigkeit, Depression und depressiven Symptomen, Unruhe, Angst, chronischer Müdigkeit, Dysästhesie, Aufmerksamkeitsstörungen, Gedächtnisstörungen, Kopfschmerzen, Schwindel, Reizbarkeit, Appetitverlust, Gewichtsverlust, Übelkeit, psychogenen Hautirritationen und EEG-Veränderungen (für eine Übersicht über die Wirkung von EMF auf diese Erkrankungen siehe Pall, 2016).

Zwei Langzeitstudien zeigten, dass das Risiko für die Entwicklung von ADHS-Symptomen mit der Nutzung von Mobiltelefonen verbunden ist. Peri- und postnatale Handy-Expositionen korrelieren mit Verhaltensproblemen und Aufmerksamkeitsdefiziten (Divan et al., 2008). Außerdem

besteht ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von ADHS-Symptomen durch mobiles Telefonieren; allerdings bezog sich dieses Ergebnis nur auf Kinder, die einer relativ hohen Bleibelastung ausgesetzt waren (Byun et al., 2013).

Die pathologische Veränderung der Gehirnaktivität kann zu einer Verschlechterung von neurologischen Symptomen und Störungen führen. Ein gutes Beispiel ist die Arbeit von Relova et al. (2010), in der Epilepsie-Patienten untersucht wurden, die bei der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern durch Mobiltelefone mit einer starken Verlagerung der Gehirnaktivität in die Beta- und Gamma-Bereiche reagierten. Diese hochfrequenten EEG-Aktivitäten sind oft mit einem erhöhten Risiko für Krampfanfälle verbunden.

Kinder und Jugendliche scheinen gegenüber EMF-Exposition sehr empfindlich zu sein (für eine Übersicht siehe Sage und Burgio, 2018). Die Studie von Croft et al. (2010) dokumentiert einen signifikant höheren Anstieg der EEG-Alpha-Aktivität unter einer EMF-Exposition mit den 2G-Mobiltelefonsystemen als bei erwachsenen Probanden. Neuere Studien indizieren, dass EMF die Bildung und Differenzierung neuronaler Stammzellen während der Embryonalentwicklung hemmen und diese sogar die reproduktive und neuronale Gesundheit von Erwachsenen beeinflussen können, wenn sie diesen Feldern pränatal ausgesetzt waren (siehe Übersicht Kaplan et al., 2016). Gehirne von Kindern weisen eine höhere Absorption von elektromagnetischer Strahlung dieser Art auf und es wurde eine Temperaturerhöhung im Gehirn bei Säuglingen beobachtet (Stankovic et al., 2017).

Zusammenfassend zeigten bisherige Forschungen starke Effekte von EMF-Exposition auf die Gehirnaktivität, kognitive Funktionen und Gehirngesundheit auf. Die Verschiebung der Gehirnaktivität insgesamt ist oft mit unterschiedlichen Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit und Gesundheit verbunden.

Eine technische Lösung, um die Auswirkungen von EMF durch die Verwendung von Mobiltelefonen zu reduzieren, sind Handy-Chips, die an den Mobiltelefonen oder auf deren Oberflächen angebracht werden. Diese Handy-Chips werden kommerziell hauptsächlich in europäischen Ländern vertrieben, und es wird damit geworben, dass sie eine schützende Wirkung auf den menschlichen Körper gegen elektromagnetische Strahlung haben, die von Mobiltelefonen ausgeht. Bisher gibt es keine systematischen Untersuchungen, ob diese Handy-Chips eine Wirkung auf die Gehirnaktivität haben, wenn sie den EMF durch Mobiltelefone ausgesetzt sind.

Die vorliegende Studie untersuchte die Wirkungen auf die EEG Gehirnaktivität bei der Nutzung von Handy-Chips, wenn die Teilnehmer den EMF ausgesetzt sind. Veränderungen in den Frequenzen des EEGs können als wissenschaftlicher Nachweis gelten, dass die Exposition von EMF, verursacht durch die Verwendung der Mobilfunkgeräte, Auswirkungen auf die Gehirnaktivität hat die EEG-Wellen (insbesondere die Theta-, Alpha-, Beta- und Gamma-Frequenzbänder) können Erkenntnisse über psychophysiologische Zustände wie etwa Wachheit, Bewusstsein und Befindlichkeit geben. Die Analyse der EEG-Frequenzveränderungen kann zu einem besseren Verständnis der physiologischen (Schlafstörungen, Erschöpfungszustände, Stress) und psychischen Veränderungen (erhöhte Reizbarkeit, Erregbarkeit, Konzentrations-schwierigkeiten) durch EMF-Exposition beitragen (für eine Übersicht siehe Pall, 2016).

Ein wichtiger Aspekt dieser Studie ist die Untersuchung der Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung auf die Gehirnaktivität und die Konzentrationsfähigkeit während einer kognitiven Aufgabe, indem unterschiedliche Frequenzbereiche des EEG

sowohl im Ausgangszustand als auch während der kognitiven Aktivität gemessen werden. Bislang gibt es keine systematischen Studien über die Auswirkungen von Handy-EMFs unter Arbeitsbedingungen, wenn das Gehirn mit kognitiv anspruchsvollen Aufgaben beschäftigt ist wie sie im Arbeitsalltag ausgeführt werden. Die meisten früheren neurophysiologischen Studien haben die Wirkungen von EMF auf die Gehirnaktivität im Ruhezustand untersucht. Um die Auswirkungen der Mobilfunkstrahlung zu testen und die Wirksamkeit technischer Lösungen zur Reduzierung dieser Auswirkungen auf die Arbeitsumgebung zu bewerten, haben wir den Einsatz eines handelsüblichen Handy-Chips unter Arbeitsbedingungen getestet und gemessen, ob die Auswirkungen der Mobilfunkstrahlung auf die EEG-Gehirnaktivität systematisch reduziert wird.

Diese Studie untersuchte die Auswirkungen auf die Gehirnaktivität im Ruhezustand und während eines Aufmerksamkeits-Tests von einer Anwendung eines Smartphones mit einem Handy-Chip, einem Placebo-Chip aus dem gleichen Rohmaterial wie der Handy-Chip, und zur Kontrolle von einem Smartphone ohne Chip [experimentelle Bedingung „kein Chip“] bei der Exposition von EMF durch diese Mobiltelefone. Das EEG ermöglicht eine aussagekräftige Beurteilung des psychophysiologischen Aufmerksamkeitsgrads sowie der Auswirkungen auf die Gehirnphysiologie. Die Daten wurden durch eine differenzierte Auswertung der EEG-Frequenzen in den Bereichen Theta (4-7,5 Hz), Alpha (8-13 Hz), Beta (14-30 Hz) und Gamma (31-70 Hz) analysiert. Dies ermöglicht eine Interpretation der Ergebnisse im Kontext des psychophysiologischen Zustands, der Konzentration sowie der Leistungsfähigkeit des kognitiven Systems, die durch die Veränderungen in der Gehirnaktivität bestimmt werden, welche durch die spezifischen EEG-Frequenzbereiche indiziert werden. Wir stellten die Hypothese auf, dass die Aktivität der Beta- und Gamma-Frequenzbänder während der Exposition durch Mobilfunk ansteigt, so wie es bisherige Studien zeigten (Hinrikus et al., 2008; Perentos et al., 2013; Suhova et al., 2013). Ferner nahmen wir an, dass die Anwendung eines Handy-Chips die Wirkungen der EMF, die von Mobiltelefonen emittiert werden, auf die EEG-Gehirnaktivität verändert.

MATERIALIEN UND METHODEN

Studienteilnehmer

Die vorliegende Studie wurde an 30 gesunden Probanden im Alter von 21 bis 35 Jahren (Durchschnittsalter: 25,7 Jahre) durchgeführt. Alle Teilnehmer waren neurologisch gesund und hatten keine Vorgeschichte mit neurologischen Störungen oder Erkrankungen. Alle Probanden verfügten über eine normale Sehfähigkeit oder es lag eine Korrektur auf eine normale Sehfähigkeit vor. Die Probanden gaben vor Beginn der Studie ihre schriftliche Zustimmung. Keiner der Probanden kannte den Hintergrund und das Ziel der Studie. Die Probanden wurden nach Abschluss des Studienprotokolls über den Hintergrund und das Ziel der Studie informiert. Die experimentellen Prozeduren wurden von der lokalen Ethikkommission der Johannes Gutenberg-Universität Mainz genehmigt. Alle experimentellen Vorgehensweisen entsprachen vollständig den beschriebenen Richtlinien der *World Declaration of Helsinki* und den nationalen Vorschriften.

Versuchsapparatur

Mobiltelefone und Applikation der Chips

Für diese Studie wurden drei Mobiltelefone vom Typ iPhone 5 S verwendet. Die Mobiltelefone unterschieden sich nur in einer

Eigenschaft: Auf einem der Mobiltelefone war ein Handy-Chip (GDM40 15 02 60, Gabriel-Tech, Kelkheim, Deutschland), auf einem weiteren Mobiltelefon ein Placebo-Chip (GDM40 15 01 60, Gabriel-Tech, Kelkheim, Deutschland) gleichen Aussehens und Materials wie der Handy-Chip angebracht. In der Studie wurde bei dem dritten Mobiltelefon kein Chip angebracht, d. h. die Verwendung erfolgte so, wie vom Hersteller (Apple, Cupertino, CA, USA) geliefert. Die Tests wurden im doppelblinden Studiendesign durchgeführt: Weder die Versuchsleiter, noch die Probanden wussten, welches der drei Mobiltelefone verwendet wurde. Die Mobiltelefone wurden in der Studie mit "Handy 1" (Placebo-Chip), "Handy 2" (Handy-Chip) und "Handy 3" (kein Chip) benannt: (1) Handy 1: iPhone 5 S weiß, ausgestattet mit dem Placebo-Chip GDM40 15 01 60, IMEI: 352053069210089, Seriennummer: DX3Q114WFFG9, Telefon: 0152 0193 7241. (2) Handy 2: iPhone 5 S weiß, ausgestattet mit dem Handy-Chip GDM40 15 02 60, IMEI: 359266062736925, Seriennummer: DX3QMM6FFG9, Telefon 0152 0192 5156. (3) Handy 3; iPhone 5 S weiß, Telefon unverändert im Originalzustand, IMEI: 352053068701567, Seriennummer: DX3Q10RVFFG9, Telefon 0152 0192 0539.

Die Mobiltelefone wurden an einem Träger auf einem Stativ neben dem linken Ohr des Probanden in einem Abstand von 1,0 cm befestigt. Es wurde ein Radio verwendet, um ein Rauschen zur Aufrechterhaltung des Mobiltelefonats zu erzeugen, wenn die Messungen der jeweiligen Mobiltelefone (Handy 1, Handy 2 oder Handy 3) durchgeführt wurden und ein Anruf von einem anderen Mobiltelefon (iPhone 5 S, Apple, Cupertino, CA, USA) empfangen wurde. Die Probanden trugen Ohrstöpsel, um das Hintergrundrauschen und den sensorischen und akustischen Einfluss auf die Gehirnaktivität zu minimieren.

Elektroenzephalogramm

Es wurden Elektroden auf die Kopfhaut der Probanden gesetzt, um die Gehirnaktivität über ein EEG aufzuzeichnen. Die Elektroden dienten als Schnittstelle zwischen den Probanden und den Geräten für die Aufzeichnung der spezifischen Gehirnaktivität. Um die Übertragung des Signals von der Kopfhaut auf die Elektroden zu ermöglichen, wurde ein Elektrolyt aufgetragen (OneStep EEG-Gel®, H+H Medizinprodukte GbR, Münster, Deutschland). Dieses bestand aus Natrium- und Chloridionen. Ein Differenzialverstärker wurde für die Anzeige der EEG-Wellen verwendet. Mit den EEG- und EMF-Messungen wurden alle elektrischen Signale des EEGs sowie Störsignale erfasst. Die spontane EEG-Gehirnaktivität wurde mit dem tragbaren 32-Kanal-EEG-System Micromed® Brain Quick (Venedig, Italien) über 19 Elektroden mit einer Abtastrate von 1.024 Hz aufgezeichnet, die nach dem internationalen 10-20-System angebracht wurden, wobei die Nase der Referenzpunkt war.

Während der Aufnahme verwendete das Micromed® Softwaresystem Plus Evolution (Venice, Italien) einen Hochpassfilter bei 0,05 Hz und einen Tiefpassfilter bei 100 Hz. Zur Erfassung der horizontalen und vertikalen Augenbewegungen wurde ein bipolares Elektrookulogramm (Micromed®, Venice, Italien) verwendet und zur Aufzeichnung der elektromyographischen Aktivität der Nacken- und Schultermuskulatur wurde ein Elektromyogramm eingesetzt, um Artefakte zu erfassen, die die EEG-Messungen potentiell beeinträchtigen können. Die elektromagnetischen Hochfrequenzen (HF) wurden kontinuierlich als Regelgröße (ROM Elektronik GmbH, Deisenhausen, Deutschland) aufgezeichnet.

Erfassung der EMFs

Während der gesamten Studie lagen die Messwerte zur Erfassung der EMF im Labor unter den unten angegebenen unteren Grenzwerten. Für die Messungen im Ruhezustand wurden die Probanden in dorsaler Position auf eine Schaummatratze gelegt. Der d2-R-Aufmerksamkeitstest wurde mit den Probanden durchgeführt, während sie auf einem Bürostuhl an einem Schreibtisch saßen. Die Schaumstoffmatratze wurde an einer speziell markierten festen Position im Labor platziert, so dass jede Messung unter genau den gleichen Voraussetzungen durchgeführt wurde. Die EMF im Labor, insbesondere der Ort und die Schaummatratze, auf der die Probanden positioniert waren, sowie der Arbeitsplatz, an dem der Proband den Aufmerksamkeitstest durchführte, wurden vor jeder Messung auf EMF vermessen. Das elektrische Wechselfeld (Niederfrequenz, NF), das magnetische Wechselfeld (Niederfrequenz, NF), das konstante Magnetfeld (Magnetostatik) und die elektromagnetische HF wurden erfasst, um sicherzustellen, dass alle Messungen unter den gleichen Voraussetzungen durchgeführt wurden und dass Einflüsse von Schwankungen der externen EMF ausgeschlossen sind sowie deren Auswirkungen auf die Hirnaktivität.

Zur Erfassung der folgenden fünf Parameter der EMF wurden folgende Geräte verwendet: (1) Elektrisches Wechselfeld (NF): 3D-Sensor für elektrische Wechselfelder (NF) ausgelegt für eine dreidimensionale Messung (ROM Elektronik GmbH, Deisenhausen, Deutschland); Arbeitsbereich 0-20 V/m, 0-200 V/m, 0-2.000 V/m; Frequenzbereich von 10 Hz bis 400.000 Hz. (2) Wechselfeld (NF): 3D-Sensor für magnetische Wechselfelder (NF), (Reiner Fauser Elektrotechnik, München, Deutschland) Arbeitsbereich ± 0 bis ± 20.000 nT, Frequenzbereich ± 5 bis ± 400.000 Hz. (3) Magnetisches Gleichfeld (Magnetostatik): 3D-Sensor für magnetische Gleichfelder (ROM Elektronik GmbH, Deisenhausen, Deutschland); Arbeitsbereich ± 7 bis ± 200.000 nT, Frequenzbereich 0-10 Hz. (4) Elektromagnetische HF: Hochfrequenzanalysator HFA-3 (ROM Elektronik GmbH, Deisenhausen, Deutschland); Arbeitsbereich 6 bis 2.000 mV/m-0.1 bis 10.000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, (= 10 pW/cm^2 bis 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), Frequenzbereich 10 MHz bis 2.5 GHz. (5) Elektromagnetische HF: High-Frequency Master IV (ROM Elektronik GmbH, Deisenhausen, Deutschland) Arbeitsbereich 6 bis 4.400 mV/m-0.1 bis 50.000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (10-5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) Frequenzbereich 1 bis 6.000 MHz/1 bis 10.000 MHz/ 50 bis 3.000 MHz.

Für die elektromagnetische Strahlung gelten folgende Grenzwerte nach der deutschen Richtlinie SBM-2008/IBN für Baubiologie als unbedenklich: (1) Elektrisches Wechselfeld (NF): $< 0,3$ V/m. (2) Magnetisches Wechselfeld (NF): < 20 nT. (3) Magnetisches Gleichfeld: < 1000 nT. (4) Elektromagnetische HF: $< 0,1$ $\mu\text{W}/\text{m}^2$.

Aufmerksamkeitstest

Diese Studie verwendete ein psychologisch-diagnostisches Testverfahren, den d2-R-Aufmerksamkeitstest (Brickenkamp et al., 2010). Der d2-R-Aufmerksamkeitstest (d2-R-Test) ist eine standardisierte psychologische Testmethode zur Erfassung der Konzentrationsfähigkeit. In **Abbildung 1** ist eine Beispielzeile des d2-R-Tests als dargestellt. Der Test besteht aus einer DIN-A4-Seite (DIN A4) und wird mit einem Bleistift oder Kugelschreiber ausgefüllt. Die Aufgabe der Testperson besteht darin, bestimmte Teile der Testobjekte von anderen zu unterscheiden, indem sie markiert oder angekratzt werden. Das Testverfahren misst die Quantität und Qualität der Arbeit, indem die Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen berechnet wird und die Fehler, die während des Arbeitsprozesses gemacht werden. Das Testblatt des d2-R-Tests besteht aus 14 Zeilen mit

je 57 Zeichen. Die Zeichen sind die Buchstaben "d" und "p". Sie werden von verschiedenen Markierungen umgeben, die aus ein



ABBILDUNG 1 | Beispielzeile des d2-R-Tests.

bis vier vertikalen Linien bestehen und die über oder unter den Zeichen positioniert sind. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, alle Buchstaben "d" mit insgesamt zwei Linien durchzustreichen. Ein Fehler besteht dann, wenn ein Buchstabe "d" nicht durchgestrichen wird, der Buchstabe "p" oder der Buchstabe "d" mit mehr oder weniger als 2 Linien gekennzeichnet wird. Der Test ist zeitlich begrenzt, so dass die Probanden nach 4:40 Minuten aufhören müssen. Der Schwierigkeitsgrad des Tests besteht aus dem Zeitlimit und der Herausforderung, zwischen relevanten und irrelevanten Zeichen zu unterscheiden.

Experimenteller Ablauf

Die Studie wurde in den Laboren des Instituts für Sportwissenschaft der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (Deutschland) durchgeführt. Jeder Teilnehmer stimmte zu, für das Testen an drei Sitzungen zu je 60 Minuten teilzunehmen. Drei verschiedene Versuchsbedingungen wurden getestet: Handy 1 = Placebo-Chip, Handy 2 = Handy-Chip, Handy 3 = kein Chip. Die Sequenz der drei Sitzungen wurde randomisiert, um Effekte aufgrund von Zeit, Gewohnheit und Übung zu vermeiden. Es wurde ein doppelblindes Studiendesign durchgeführt. Jede experimentelle Sitzung begann mit der schriftlichen Zustimmung der Probanden sowie einer Beschreibung über den Zweck des Testverfahrens und der Datenerhebung. Danach wurde ein weiterer Fragebogen vorgelegt, um einen Einblick in die demographischen Daten zu erhalten. Zusätzlich wurden die Teilnehmer zu neurologischen Beeinträchtigungen befragt, dem Kaffeekonsum, der Einnahme von Medikamenten oder Alkohol sowie Fragen zum allgemeinen Zustand und der Schlafqualität der letzten Nacht vor dem Test. Außerdem füllten die Teilnehmer vor und nach jeder Versuchsbedingung den standardisierten Fragebogen MDBF (Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen) über ihren subjektiven psychophysiologischen Zustand aus. Nach Ausfüllen der Fragebögen wurde das Gerät zur Messung des EEG angewendet. Alle Untersuchungen wurden in einem Labor durchgeführt, in dem keine EMF gemessen wurden. Vor jeder Messung wurde das Labor auf die Existenz von EMF unter Verwendung der oben beschriebenen Geräte gescannt, um jegliche Interferenzen mit den Tests zu vermeiden. Die EMF-Störsignale durch die experimentelle Nutzung der Mobiltelefone wurden während jeder Messung aufgezeichnet, um gleiche experimentelle Voraussetzungen sicher zu stellen. Ein Vorabtest wurde durchgeführt, bestehend aus 2-min-EEG-Messungen im Ruhezustand mit offenen und geschlossenen Augen in dorsaler Position ohne Verwendung eines Mobiltelefons. Darauf folgte eine 30-minütige Messung, bei der eine der drei experimentellen Bedingungen für den Mobilfunk getestet wurde (Handy 1, Handy 2 oder Handy 3). Die Probanden wurden mit offenen Augen auf eine Schaumstoffmatratze gelegt und ein Mobiltelefon wurde in einem Abstand von 1,0 cm vom linken Ohr platziert. Zur Überprüfung der Aufmerksamkeitsleistung wurde der Aufmerksamkeitstest (d2-R-Test) erläutert und mit den Teilnehmern am Schreibtisch durchgeführt, während diese auf einem Bürostuhl saßen. Für

jeden Test betrug das Zeitlimit 4:40 Minuten. Während des Aufmerksamkeitstests wurde eine EEG-Messung durchgeführt und das Mobiltelefon wurde im Abstand von 1,0 cm vom linken Ohr des Teilnehmers platziert. Nach jeder Exposition mit dem Mobiltelefon wurden zwei Messungen mit offenen und geschlossenen Augen durchgeführt, die jeweils 2 Minuten dauerten. Für alle drei spezifischen Einstellungen wurde das Testverfahren randomisiert durchgeführt unter Verwendung von Handy 1, Handy 2 oder Handy 3.

Datenauswertung

EEG Signal

Die kontinuierliche Frequenzanalyse, die auch unter dem Begriff Spektralanalyse bekannt ist, ist für die Untersuchung von grundsätzlicher Bedeutung und wird daher im Folgenden ausführlich beschrieben. Die Spektralanalyse hängt von den Spektren verschiedener EEG-Sequenzen ab, die als komprimierte Spektralfelder (CSA) bezeichnet werden. Sie zeigen die Verteilung der Frequenzen in den EEG-Signalen und die Veränderungen in der Frequenzverteilung. Bedingt durch die Fourier-Transformation tragen auch die Amplituden der EEG-Wellen zu den Ergebnissen bei. Für die Handhabung der EEG-Daten und deren statistischen Auswertung wurde eine Software basierend auf Matlab EEGLAB (Swartz Center für Computational Neuroscience, San Diego, USA) verwendet. Es wurde mit der Software eine mehrphasige Verarbeitung dieser Daten durchgeführt, um die analysierten EEG-Rohdaten nach der Messung darzustellen. Die importierten EEG-Daten wurden durch eine unabhängige Komponentenanalyse (ICA) verarbeitet und störende Artefakte, die durch Augenbewegungen, Muskelaktivität und EMF verursacht wurden, wurden manuell über die Datenanalyse eliminiert. Die spezifischen Leistungsdichtespektren der Signale wurden durch die Fast Fourier-Transformationen für die Theta- (4-7,5 Hz), Alpha- (8-13 Hz), Beta- (14-30 Hz) und Gamma- (31-70 Hz) Frequenzbänder bestimmt. Die Leistungsflussdichten der EMF wurden in chronologischer Reihenfolge mit den berechneten Leistungsdichtespektren des EEGs korreliert.

In einem zweiten Schritt wurde eine Dipolanalyse der EEG-Daten für die Faktoren Chip (Handy-Chip, Placebo-Chip, kein Chip) und Versuchsbedingungen durchgeführt (Prätest ohne EMF-Exposition mit offenen Augen, Prätest ohne EMF-Exposition mit geschlossenen Augen, EMF-Exposition durch ein Mobiltelefon im Ruhezustand, Exposition durch ein Mobiltelefon während des Aufmerksamkeitstests, Posttest ohne EMF-Exposition mit offenen Augen, Posttest ohne EMF-Exposition mit geschlossenen Augen). Nach der Zerlegung der EEG-Signale durch ICAs wurde ein dreidimensionaler Modellkopf berechnet, der die exakte Lokalisierung und Darstellung der Ursprungssignale als quellenäquivalente Dipole ermöglichte.

In einem dritten Schritt wurde eine Korrelationsanalyse des kontinuierlich aufgenommenen elektromagnetischen HF Signals und des EEG-Signals durchgeführt. Die Daten der Messungen wurden in die Software Matlab importiert und es wurde eine Korrelationsanalyse mit dem EEG-Signal für die Theta- (4-7,5 Hz), Alpha- (8-13 Hz), Beta- (14-30 Hz) und Gamma- (31-70 Hz) Frequenzbänder durchgeführt.

Daten des Aufmerksamkeitstests

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit über den d2-R-Aufmerksamkeitstest wurden folgenden Parameter bestimmt: Anzahl der bearbeiteten Zeichen, Anzahl der Auslassungsfehler, Anzahl der Verwechslungsfehler sowie der Konzentrationsleistungswert. Die Anzahl der bearbeiteten Zeichen ist ein

Indikator für die Summe aller bearbeiteten Textelemente und berücksichtigt nicht, ob die Elemente richtig oder falsch klassifiziert wurden. Die Anzahl aller Auslassungsfehler beinhaltet die übersehenen oder ausgelassenen Zeichen. Die Anzahl aller Verwechslungsfehler beinhaltet alle fälschlicherweise markierten Testelemente. Der Konzentrationsleistungswert wurde berechnet, indem die Anzahl der falschen und falsch markierten Testelemente von der Gesamtzahl der korrekt markierten Zeichen subtrahiert wurde.

Statistische Analyse

Die Stichprobengröße wurde vor der Studie über die Anwendung der Software GPower 3.0 für zusammenhängende Stichproben berechnet (Faul et al., 2007, 2009), um eine ausreichende statistische Aussagekraft für die vorliegende Studie zu gewährleisten. Für die EEG-Daten wurden 3×6 Varianzanalysen (ANOVAs) mit Messwiederholungen für die Leistungsdichtespektren jedes EEG-Frequenzbandes (Theta, Alpha, Beta, Gamma) durchgeführt. Bonferroni-korrigierte *Post-hoc*-Tests wurden für die Faktoren Chip (Handy-Chip, Placebo-Chip, kein Chip) und Versuchsbedingung durchgeführt (Vorabversuch ohne EMF-Exposition eines Mobiltelefons mit offenen Augen, Vorabversuch ohne EMF-Exposition eines Mobiltelefons mit geschlossenen Augen, EMF-Exposition eines Mobiltelefons im Ruhezustand, Exposition eines Mobiltelefons während des Aufmerksamkeitstests, Nachprüfung ohne EMF-Exposition eines Mobiltelefons mit offenen Augen, Nachprüfung ohne EMF-Exposition eines Mobiltelefons mit geschlossenen Augen). Um die Effektstärke zu bestimmen, wurde das partielle Eta-Quadrat berechnet.

Die Daten der EEG-Dipolanalyse wurden den ANOVAs korrigierten *post-hoc*-Tests nach Bonferroni unterzogen. Hinsichtlich der variablen Anzahl von Entstehungsorten der Aktivierung wurden die ANOVAs wiederholter Messungen für die Faktoren Chip (Handy-Chip, Placebo-Chip, Ohne-Chip) und Versuchsbedingungen durchgeführt (Prätest ohne EMF-Exposition mit offenen Augen, Prätest ohne EMF-Exposition mit geschlossenen Augen, EMF-Exposition durch ein Mobiltelefon im Ruhezustand, Exposition durch ein Mobiltelefon während des Aufmerksamkeitstests, Posttest ohne EMF-Exposition mit offenen Augen, Posttest ohne EMF-Exposition mit geschlossenen Augen). Um die Effektstärke zu bestimmen, wurde das partielle Eta-Quadrat berechnet.

Für die Daten der EEG- und EMF-Korrelationen wurde der Pearson-Korrelationskoeffizient für jedes EEG-Frequenzband (Theta, Alpha, Beta, Gamma) berechnet. Zur Bestimmung der Effektstärke wurde das partielle Eta-Quadrat berechnet.

Für die Parameter des d2-R-Tests (Anzahl aller bearbeiteten Zeichen, Anzahl aller Auslassungsfehler, Anzahl aller Verwechslungsfehler, Konzentrationsleistung) wurden separate ANOVAs mit Messwiederholung durchgeführt. Es wurde der Sphärizitäts-Test nach Mauchly angewendet, um die Voraussetzungen der Sphärizität zu überprüfen. Wenn die Daten nicht die Voraussetzung der Sphärizität erfüllten, wurde eine Greenhouse-Geisser-Korrektur angewendet. In einem weiteren Schritt wurden Bonferroni-korrigierte *post-hoc*-Tests durchgeführt. Zur Bestimmung der Effektstärke wurde das partielle Eta-Quadrat berechnet.

Ein Signifikanzniveau von $p < 0,05$ wurde für alle statistischen Analysen festgesetzt.

ERGEBNISSE

EEG: Spontane Aktivität

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der EEG-Messungen im Ruhezustand und während des Aufmerksamkeits-tests dargestellt. Die Darstellung deckt folgende Frequenzbereiche ab: Theta-Bereich (4-7,5 Hz), Alpha-Bereich (8-13 Hz), Beta-Bereich (14-30 Hz), Gamma-Bereich (31-70 Hz). Die **Abbildung 2A-D** stellt die spezifischen Frequenzbereiche dar und zeigt die entsprechende Gehirnaktivität. Die Ergebnisse zeigen Veränderungen der Gehirnaktivität in den Theta-, Alpha-Beta- und Gammabändern während der EMF-Exposition in den experimentellen Bedingungen mit Placebo-Chip und ohne Chip im Ruhezustand sowie während des Aufmerksamkeits-tests. Die Anwendung des Handy-Chips reduzierte die verursachte Wirkung der EMF auf die Gehirnaktivität in allen Frequenzbändern während der EMF-Exposition im Ruhezustand sowie während des Aufmerksamkeits-tests.

Die spontane EEG-Aktivität im Theta-Bereich ist in **Abbildung 2A** dargestellt. Die ANOVA zeigte für den Faktor Chip einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 4,061$, $p = 0,022$, partielles $\eta^2 = 0,13$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Handy-Chip und dem Placebo-Chip, $p = 0,034$, und der Bedingung ohne Chip, $p = 0,015$. Die ANOVA zeigte für den Faktor Versuchsbedingung einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(5, 145)} = 2,931$, $p = 0,015$, partielles $\eta^2 = 0,09$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten signifikante Unterschiede zwischen dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,02$, und dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,01$. Darüber hinaus wurden Unterschiede gefunden beim Vergleich zwischen dem Posttest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,03$, und dem Posttest mit der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,02$. Die Interaktion zwischen den Faktoren Chip und Versuchsbedingung war signifikant, $F_{(10, 290)} = 2,079$, $p = 0,010$, partielles $\eta^2 = 0,08$.

Die spontane EEG-Aktivität im Alpha-Bereich ist in **Abbildung 2B** dargestellt. Die ANOVA für den Faktor Chip ergab einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 4,384$, $p = 0,017$, partielles $\eta^2 = 0,13$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Handy-Chip im Vergleich zum Placebo-Chip, $p = 0,031$, und der Bedingung ohne Chip, $p = 0,020$. Die ANOVA zeigte für den Faktor Versuchsbedingung einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(5, 145)} = 3,226$, $p = 0,009$, partielles $\eta^2 = 0,10$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten statistisch signifikante Unterschiede zwischen dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,03$, und dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,03$. Weiterhin erhielt man Unterschiede zwischen dem Posttest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,02$, und dem Posttest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,02$. Die Interaktion zwischen Chip und Versuchsbedingung war signifikant, $F_{(10, 290)} = 2,319$, $p = 0,012$, partielles $\eta^2 = 0,24$.

Die spontane EEG-Aktivität im Beta-Bereich ist in **Abbildung 2C** dargestellt. Die ANOVA zeigte für den Faktor Chip einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 3,829$, $p = 0,027$, partielles $\eta^2 = 0,12$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Handy-

Chip im Vergleich zum Placebo-Chip, $p = 0,021$, und der experimentellen Bedingung ohne Chip, $p = 0,01$. Die ANOVA zeigte für den Faktor Versuchsbedingung einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(5, 145)} = 2,791$, $p = 0,019$, partielles $\eta^2 = 0,09$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,02$, sowie dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,009$. Darüber hinaus erhielt man signifikante Unterschiede zwischen dem Posttest bei Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,02$, und dem Posttest bei Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,01$. Die Interaktion von Chip und Versuchsbedingung war signifikant, $F_{(10, 290)} = 2,054$, $p = 0,012$, partielles $\eta^2 = 0,06$.

Die spontane EEG-Aktivität im Gamma-Bereich ist in **Abbildung 2D** dargestellt. Die ANOVA zeigte für den Faktor Chip einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 3,257$, $p = 0,044$, partielles $\eta^2 = 0,10$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Handy-Chip und dem Placebo-Chip, $p = 0,027$, sowie beim Vergleich von Handy-Chip und der experimentellen Bedingung ohne Chip, $p = 0,011$. Die ANOVA zeigte für den Faktor Versuchsbedingung einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(5, 145)} = 2,472$, $p = 0,035$, partielles $\eta^2 = 0,08$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten signifikante Unterschiede zwischen dem Prätest bei und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,03$, und dem Prätest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,008$. Weiterhin erhielt man Unterschiede zwischen dem Posttest und der Exposition durch das Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,03$, und dem Posttest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,009$. Die Interaktion von Chip und Versuchsbedingung war signifikant, $F_{(10, 290)} = 2,079$, $p = 0,026$, partielles $\eta^2 = 0,07$.

EEG Dipol-Analyse

Die Ergebnisse der Dipol-Analyse sind in **Abbildung 3** dargestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass im Vergleich mit den experimentellen Bedingungen mit dem Handy-Chip mehr Aktivierungsquellen im Gehirn vorzufinden sind, wenn eine EMF-Exposition durch ein Mobiltelefon in der experimentellen Bedingung des Placebo-Chips und der Bedingung ohne Chip vorlag. Die ANOVA zeigte für den Faktor Chip einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 3,98$, $p = 0,020$, partielles $\eta^2 = 0,15$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen dem Handy-Chip im Vergleich zum Placebo-Chip, $p = 0,02$, und der Bedingung ohne Chip, $p = 0,02$. Die ANOVA zeigte für den Faktor Versuchsbedingung einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(5, 145)} = 2,81$, $p = 0,017$, partielles $\eta^2 = 0,19$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten statistisch signifikante Unterschiede zwischen dem Prätest und Exposition durch ein Mobiltelefon im Ruhezustand, $p = 0,03$. Weiterhin zeigte sich ein Unterschied zwischen dem Prätest und der Exposition durch ein Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,03$, und ein Unterschied zwischen dem Nachtest und der Exposition durch das Mobiltelefon während des Aufmerksamkeits-tests, $p = 0,03$. Schließlich wurden Unterschiede zwischen dem Posttest und der Exposition durch ein Mobiltelefon im Ruhezustand gezeigt, $p = 0,04$. Die Interaktion von Chip und Versuchsbedingung war signifikant, $F_{(10, 290)} = 2,26$, $p = 0,023$, partiell $\eta^2 = 0,14$.

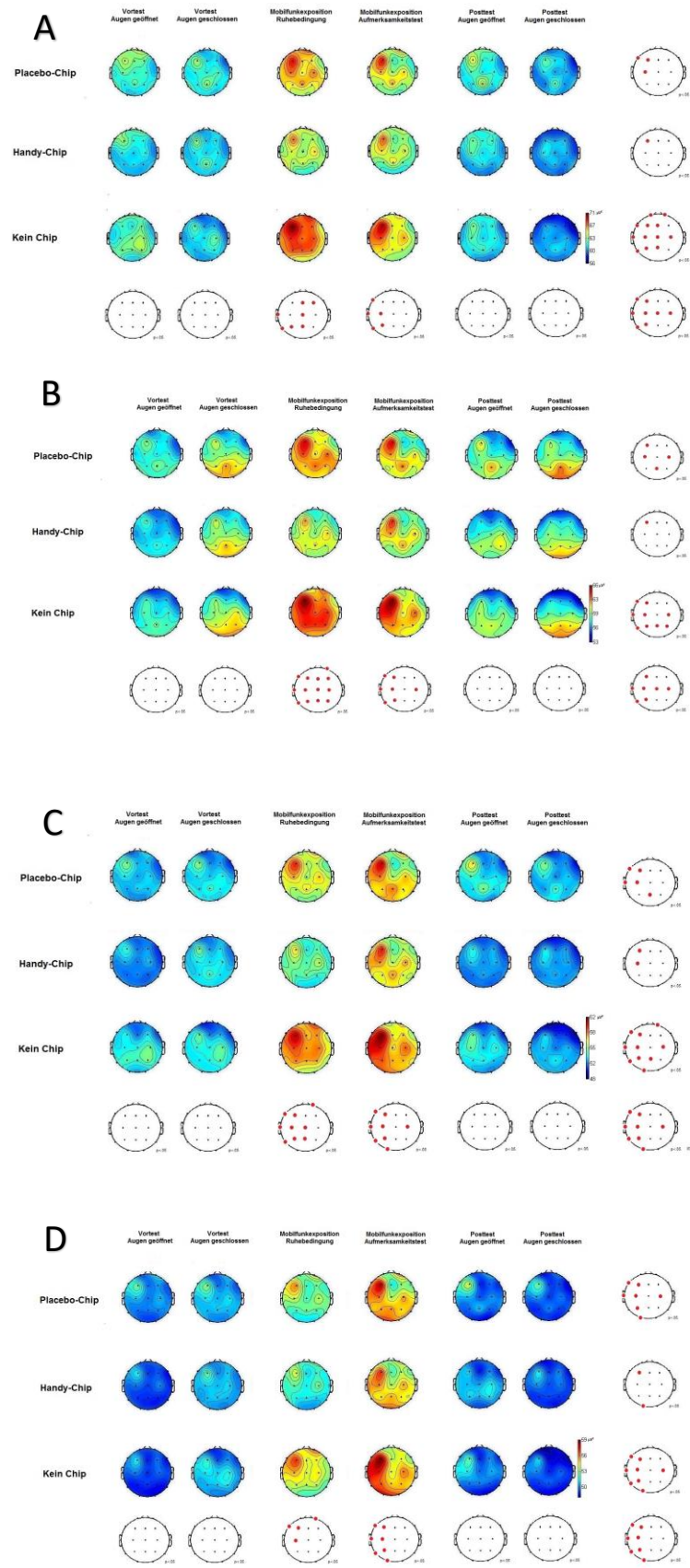


ABBILDUNG 2 | (A) EEG-Theta-Aktivität (4-7,5 Hz) vor, während und nach der Anwendung des Placebo-Chips, des Handy-Chips und ohne Chip. **(B)** EEG-Alpha-Aktivität (8-13Hz) vor, während und nach der Anwendung des Placebo-Chips, des Chips und ohne Chip. **(C)** EEG-Beta-Aktivität (13-30Hz) vor, während und nach der Anwendung des Placebo-Chips, des Handy-Chips und ohne Chip. **(D)** EEG-Gamma-Aktivität (31-70 Hz) vor, während und nach der Anwendung des Placebo-Chips, des Handy-Chips und ohne Chip.

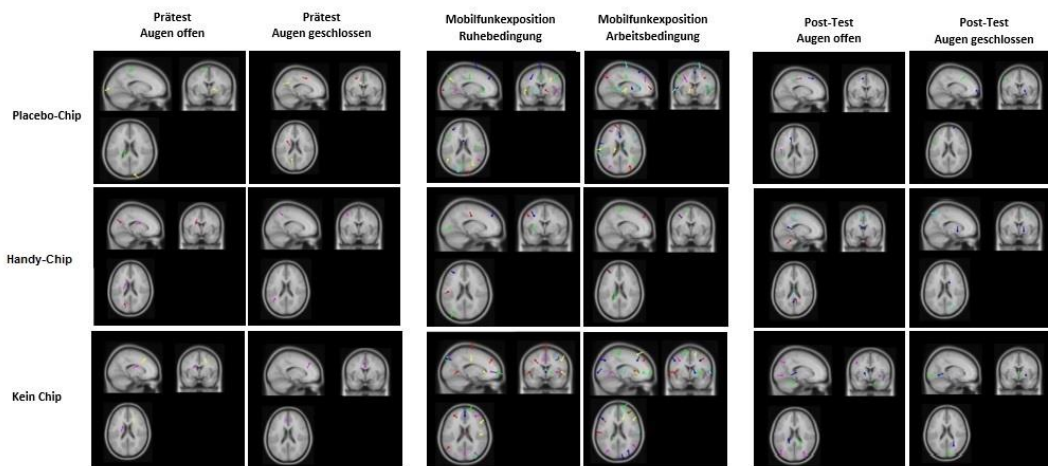


ABBILDUNG 3 | EEG-Dipol-Analyse vor, während und nach der Exposition durch ein Mobiltelefon in der experimentellen Bedingung mit dem Placebo-Chip, dem Handy-Chip und ohne Chip. Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zum Handy-Chip mehr Aktivierungsquellen im Gehirn bei der EMF-Exposition durch ein Mobiltelefon in den experimentellen Bedingungen mit dem Placebo-Chip und ohne Chip vorzufinden sind.

Zusammenhang von HF und EEG

Die Ergebnisse deuten auf einen mittleren bis starken Zusammenhang zwischen EMF-HF und der Gehirnaktivität hin. Betrachtet man den Faktor Chip (Handy-Chip, Placebo-Chip, ohne Chip), so unterscheidet sich die Exposition mit dem Handy-Chip vom Placebo-Chip und der Bedingung ohne Chip durch das Fehlen einer signifikanten Korrelation zwischen EMF-HF und dem EEG-Signal im Beta- und Gamma-Frequenzband. Dies zeigt, dass eine statistisch signifikante Korrelation zwischen elektromagnetischer HF und Gehirnaktivität in den Beta- und Gamma-Frequenzbändern nicht auftritt, wenn der Handy-Chip angewendet wird.

Die Korrelationsanalyse zeigte einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen der elektromagnetischen HF und der EEG-Aktivität für den Theta-Bereich, $r = 0,63$, $p < 0,001$, Alpha-Bereich, $r = 0,78$, $p < 0,001$, Beta-Bereich, $r = 0,83$, $p < 0,001$, und Gamma Bereich, $r = 0,75$, $p < 0,001$. Um den Einfluss der jeweiligen experimentellen Bedingung der Chips zu berücksichtigen, wurden die unterschiedlichen Expositionsbedingungen (Handy-Chip, Placebo-Chip, kein Chip) berücksichtigt und die Korrelationen zwischen den verschiedenen experimentellen Bedingungen wurden berechnet.

Nach Berücksichtigung des Faktors Chip wurden hochsignifikante Korrelationen für den Theta-Bereich nachgewiesen, $r = 0,74$, $p < 0,001$, ebenso für den Alpha-Bereich, $r = 0,48$, $p < 0,008$, Beta-Bereich, $r = 0,86$, $p < 0,001$, und für den Gamma-Bereich, $r = 0,80$, $p < 0,001$. Für den Handy-Chip wurden hochsignifikante Korrelationen für den Theta-Bereich gezeigt, $r = 0,71$, $p < 0,001$, sowie für den Alpha-Bereich, $r = 0,89$, $p < 0,001$. Die Korrelationen für den Beta-Bereich, $r = 0,29$, $p < 0,012$, und für den Gamma-Bereich, $r = 0,29$, $p < 0,015$, waren statistisch nicht signifikant. Für die experimentelle Bedingung ohne Chip wurden hochsignifikante Korrelationen für den Theta-Bereich, $r = 0,82$, $p = 0,001$, Alpha-Bereich, $r = 0,60$, $p < 0,001$, Beta-Bereich, $r = 0,71$, $p < 0,001$ und für den Gamma Bereich, $r = 0,79$, $p < 0,001$, gezeigt.

Aufmerksamkeitstest

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der d2-R-Testparameter sind in **Tabelle 1** dargestellt. Die folgenden Parameter wurden berücksichtigt, um die Aufmerksamkeit zu messen: Wert der Aufmerksamkeitsleistung, Anzahl der bearbeiteten Zeichen, Fehler durch Auslassung und Verwechslungsfehler. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu der Voraussetzung mit einem Handy-Chip eine geringere Aufmerksamkeitsleistung (Anzahl bearbeiteter Zeichen) während der EMF-Exposition unter der Bedingung mit Placebo-Chip und der Bedingung ohne-Chip.

	Placebo-Chip		Handy-Chip		Kein Chip	
	M	SD	M	SD	M	SD
Bearbeitete Zeichen	580.72	102.69	620.26	92.33	570.37	108.75
Verwechslungsfehler	0.65	1.17	0.42	0.68	0.59	1.32
Auslassungsfehler	5.97	7.24	4.36	3.61	5.88	4.93
Konzentrationsleistungswert	574.14	103.20	615.48	93.74	563.90	107.16

TABELLE 1 | Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der d2-R-Testparameter (Anzahl bearbeiteter Zeichen, Verwechslungsfehler, Auslassungsfehler, Konzentrationsleistungswert).

Für den Konzentrationsleistungswert zeigte die ANOVA einen marginal signifikanten Haupteffekt für den Faktor Chip, $F_{(2, 58)} = 2,93$, $p = 0,086$, partielles $\eta^2 = 0,02$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten, dass die Exposition mit dem Handy-Chip signifikant unterschiedliche Ergebnisse ergab, $p = 0,07$, im Vergleich zum Placebo-Chip und zur Kontrollbedingung ohne Chip, $p = 0,06$. Für die Anzahl der bearbeiteten Zeichen zeigte die ANOVA für den Faktor Chip einen signifikanten Haupteffekt, $F_{(2, 58)} = 3,25$, $p = 0,043$, partielles $\eta^2 = 0,06$. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten signifikante Unterschiede zwischen dem Handy-Chip und dem Placebo-Chip, $p = 0,04$, sowie zwischen dem Handy-Chip und der Kontrollbedingung ohne Chip, $p = 0,04$.

DISKUSSION

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine Wirkung auf die Gehirnaktivität bei einer EMF-Exposition durch die Nutzung eines Mobiltelefons in der Nähe des Kopfes. Ein Anstieg der EEG-Theta-, Alpha-, Beta- und Gamma-Aktivität wurde unter Anwendung eines Placebo-Chips und ohne Chip-Anwendung beobachtet, wenn die Testpersonen den emittierten EMF durch das Mobiltelefon ausgesetzt waren. Die Ergebnisse zeigen, dass EMF, die von Mobiltelefonen emittiert werden, lokale Veränderungen in der Gehirnaktivität verursachen können. Die Aktivierung, die hauptsächlich an der linken Seite des Gehirns bei der Exposition von emittierten EMF durch das Mobiltelefon stattfindet, weist auf eine Verbindung zwischen der emittierten EMF-Strahlung durch Mobiltelefone und der Gehirnaktivität hin, da die Testtelefone in einem Abstand von 1,0 cm vom linken Ohr angebracht waren. Während des Aufmerksamkeits-tests wurde festgestellt, dass sich die Aktivität der EEG-Beta- und -Gammawellen bei der EMF-Exposition hauptsächlich auf der linken Seite des Gehirns erhöht. Als der Handy-Chip verwendet wurde, reduzierte sich die Zunahme der EEG-Gehirnaktivität im Vergleich zu den Bedingungen mit dem Placebo-Chip und ohne Chip. Dies zeigte sich sowohl im Ruhezustand als auch während des Aufmerksamkeits-tests.

Die Gehirnaktivität erhöht sich hauptsächlich in den Frequenzbereichen Beta und Gamma und weist auf eine erhöhte Erregbarkeit des Gehirns hin, wenn es EMF durch Mobiltelefone ausgesetzt wird, so wie es unter den Bedingungen mit Placebo-Chip oder ohne Chip gezeigt wird. Die Ergebnisse der Dipol-Analyse bestätigen die Ergebnisse der EEG-Gehirnaktivität. Die Dipol-Analyse zeigte, dass im Vergleich zur Anwendung eines Handy-Chips mehr Aktivierungsquellen im Gehirn durch die EMF-Exposition eines Mobiltelefons beobachtbar sind, wenn der Placebo-Chip oder kein Chip angewendet wurde. Darüber hinaus weist die Korrelationsanalyse von der kontinuierlich aufgenommenen HF-EMF-Emission mit dem EEG-Signal auf einen starken Zusammenhang zwischen der HF-EMF-Exposition und der Gehirnaktivität hin. Im Vergleich zu den experimentellen Bedingungen mit Placebo-Chip und ohne Chip ist die Testbedingung mit dem Handy-Chip durch eine fehlende Korrelation der Gehirnaktivität in den Beta- und Gamma-Frequenzbändern gekennzeichnet. Dieser Befund zeigt, dass die Anwendung des Handy-Chips einen Anstieg in der Gehirnaktivierung reduzieren kann, die hauptsächlich in den Beta- und Gamma-Bändern stattfindet und durch EMF-Exposition durch Mobiltelefone verursacht wird im Gegensatz zu den Bedingungen mit Placebo-Chip und ohne Chip.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen die Ergebnisse vorhergehender EEG-Studien in diesem Forschungsbereich und erweitern deren Beobachtungen. Frühere Untersuchungen haben eine Zunahme der Alpha- und Beta-Aktivität gezeigt (Hinrikus et al., 2008; Suhhova et al., 2013). Ferner wurden Veränderungen in den Theta- und Gamma-Bändern festgestellt. Die Ergebnisse konnten in einer Studie von Zhang et al. (2017) bestätigt werden.

Diese systematischen Veränderungen der EEG-Aktivität könnten mit Beeinträchtigungen der kognitiven Funktionen und der Gehirngesundheit in Verbindung stehen. Über die Veränderungen der Alpha-1- und Alpha-2-Aktivität in den Nicht-REM-Schlafstadien unter EMF-Exposition wurde zuvor berichtet (Borbély et al., 1999; Huber et al., 2000). Schlafabhängige Lernprozesse, die typischerweise bei Theta- und Alpha-Aktivität auftreten wie etwa die Theta-Aktivität im Hippocampus während der Gedächtniskonsolidierung (z.B., Klimesch et al., 2007) oder dem Auftreten des mu-Rhythmus in den

motorischen Regionen zur schlafabhängigen Optimierung motorischer Fähigkeiten (z. B., Astill et al., 2014) könnte durch EMF-Exposition negativ beeinflusst werden. Eine signifikante Reduzierung motorischer Fähigkeiten nach einem Nachtschlaf unter EMF-Exposition wurde im Vergleich zu einer Kontrollgruppe gezeigt (Lustenberger et al., 2013). In diesem Zusammenhang wird argumentiert, dass eine verminderte synaptische Plastizität und damit eine beeinträchtigte Konsolidierung durch eine Verlagerung der Hirnaktivität mögliche Mediatoren für die negativen Auswirkungen der EMF-Exposition sind. Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen den Veränderungen der EEG-Theta- und -Gamma-Aktivität und beobachteten Defiziten im Arbeitsgedächtnis verursacht durch EMF-Exposition (Zhang et al., 2017). Die beobachteten Veränderungen in den EEG-Frequenzbändern könnten ein neuronales Korrelat für eine reduzierte Aufmerksamkeitsleistung sein, wie es in der hier vorliegenden Studie gezeigt wurde. Frühere Arbeiten haben auch belegt, dass EMF akute Defizite im Arbeitsgedächtnis (Zhang et al., 2017) und negative Auswirkungen auf die vorbereitenden Vorgänge bei Aufmerksamkeitsleistungen verursachten (Papageorgiou et al., 2006).

Der Anstieg der Alpha-Aktivität widerspricht einer früheren Studie von Perentos et al. (2013), die eine Abnahme der Alpha-Aktivität nach EMF-Exposition beobachteten. Wir argumentieren, dass der Unterschied ein Resultat der verschiedenen Versuchsaufbauten sein könnte. Perentos et al. (2013) setzten ihre Probanden für 20 min den EMF aus, während in der vorliegenden Studie und in anderen Arbeiten (Hinrikus et al., 2008; Suhhova et al., 2013) die Probanden 35 Minuten oder sogar über längere Zeitintervalle ausgesetzt wurden, zum Beispiel während der gesamten Schlafzeit (Borbély et al., 1999; Huber et al., 2000). Diese Unterschiede könnten zeitabhängige Auswirkungen der EMF-Exposition auf die Alpha-Aktivität reflektieren mit nichtlinearen zeitlichen Verläufen der Alpha-Aktivität während der EMF-Exposition. Diese Annahme muss in weiteren Untersuchungen überprüft werden. Ein weiterer experimenteller Umstand könnte die Tatsache sein, dass verschiedene Arten von Mobiltelefonen in den früheren Studien verwendet wurden und daher die verwendeten Geräte unterschiedliche Sendeleistungen aufweisen. Aufgrund des technischen Fortschritts bei der Sendeleistung hatte das verwendete Mobiltelefon in dieser Studie eine erhöhte Sendeleistung im Vergleich zu den verwendeten Mobiltelefonen in früheren Studien. Dies könnte schließlich auch erklären, warum die EEG-Gehirnaktivität in allen Frequenzbändern verändert wurde. Zukünftige Studien sollten den Einfluss von Modell und Übertragungsleistung der verschiedenen Mobiltelefone vergleichend auf die Gehirnaktivität untersuchen.

Eine Exposition gegenüber hochfrequenten EMF kann die Temperatur des Körpers und des Gehirns erheblich erhöhen (D'Andrea et al., 2007; Stam, 2010; Ohtani et al., 2016). Diese unspezifischen thermischen Auswirkungen durch EMF können schädlich sein und Hitzeschockproteinen sowie Hitzeschock-Transkriptionsfaktoren induzieren (Ohtani et al., 2016). Diese Stressreaktion ist auch mit einer erhöhten Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke und einem erhöhten Blutfluss verbunden, der den Stoffwechsel des Gehirns stimulieren und die Gehirnaktivierung erhöhen kann (Stam, 2010). Anhaltende Exposition kann eine allgemeine Stressreaktion verursachen, und die erhöhte Temperatur im Gehirn kann einen unspezifischen, starken Anstieg der Gehirnaktivität über den gesamten Frequenzbandbereich hervorrufen (D'Andrea et al., 2007). Diese unspezifische Stressreaktion kann sehr schädlich

sein, da sie in der Lage ist, höhere und niedrigere Frequenzen gleichzeitig zu verstärken, was gleichzeitig zu einer vollständigen Aktivierung sowohl der stimulatorischen als auch der inhibitorischen Neurotransmission führt (D'Andrea et al., 2007; Stam, 2010; Ohtani et al., 2016). Da der Chip keine Abschirmvorrichtung ist, kann er diese thermischen Auswirkungen auf die Gehirnaktivität nicht vollständig verhindern. Obwohl die neue Technologie in der Lage war, die Stimulierung der Gehirnaktivität signifikant zu reduzieren, können die schädlichen thermischen Effekte durch EMF dennoch ein erhebliches dauerhaftes Problem bleiben. Thermische Effekte können verringert werden, indem das Ausmaß und die Zeit der Exposition reduziert werden, da sie zeit- und dosierungsabhängig sind (D'Andrea et al., 2007; Stam, 2010; Ohtani et al., 2016). Der Chip kann einen Anstieg in der Gehirnaktivität signifikant und spezifisch reduzieren und die Verschiebung in höhere Frequenzbereiche verhindern, wie in dieser Studie gezeigt wird. Es sollten jedoch weitere Schutzmaßnahmen in Betracht gezogen werden, wie die Begrenzung des Expositionsmaßes und der Expositionsdauer (D'Andrea et al., 2007; Stam, 2010; Ohtani et al., 2016). Da die milde Hyperthermie, die durch hochfrequente elektromagnetische Felder verursacht wird, zu Störungen und sogar zu Verhaltensauffälligkeiten führen kann, ist dies ein weiterer wichtiger Forschungsbereich für die Sicherheitsaspekte der EMF-Exposition (D'Andrea et al., 2007). Unsere Studie zeigte eine signifikante Verringerung der kognitiven Leistungsfähigkeit nach der Exposition von EMF, da die Konzentrationsfähigkeit beeinträchtigt war. Neue Strategien wie die Entwicklung von Schutzchips, eine Reduktion der Expositionsdauer und EMF-Stärke können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen der Exposition zu minimieren. Der Handy-Chip war in der Lage, die schädlichen Auswirkungen der Exposition gegenüber hochfrequenten EMF zu reduzieren, und solche Technologien könnten Teil eines ganzheitlichen Ansatzes sein, um die negativen Auswirkungen von EMF auf die Gehirnaktivität zu minimieren.

Die vorliegenden Ergebnisse haben wichtige Implikationen für die ergonomische Gestaltung von Arbeitsumgebungen, in denen die Nutzung von Mobiltelefonen ein wesentlicher Teil der Arbeit darstellt. Der Anstieg in der Gehirnaktivierung in frontalen Hirnarealen zeigt, hauptsächlich in den Beta- und Gamma-Frequenzen, dass eine EMF-Exposition durch Mobiltelefone eine allgemeine psychophysiologische Aktivierung der Probanden verursacht. Diese externe Stimulierung der Gehirnaktivität, verursacht durch die EMF-Exposition durch Mobiltelefone deutet darauf hin, dass diese die kognitiven Funktionen im Zusammenhang mit dem frontalen Kortex, z. B. die Aufmerksamkeit und das Arbeitsgedächtnis, (Koivisto et al., 2000b; Papageorgiou et al., 2006; Zhang et al., 2017) sowie die Reaktionszeiten (Koivisto et al., 2000a) beeinträchtigen kann. Der frontale Kortex ist ein Teil des aufsteigenden retikulären Aktivierungssystems (ARAS), das die Regulation der Erregbarkeit und der psychophysiologischen Aktivierung des Menschen steuert. Kontinuierliche externe Stimulation, beispielsweise durch EMF-Exposition durch Mobiltelefone, die zu einer Langzeitaktivierung des Gehirns führt, kann zu Störungen des psychophysiologischen Aktivierungsniveaus (z. B. Überreizung), Problemen in der subjektiven Befindlichkeit (z. B. Nervosität, Reizbarkeit) in Verbindung mit Störungen der geistigen Leistungsfähigkeit (z. B. Konzentrationsprobleme, schwache Gedächtnisleistung) führen sowie zu Störungen der regenerativen Phasen eines Organismus, z. B. während des Schlafs oder während regenerativer Tagesphasen (für einen Überblick siehe Pall, 2016). Dies liegt an den Veränderungen in der natürlichen

Zusammensetzung der Frequenzbereiche der Gehirnaktivität durch diese externe Stimulation. Die vorliegende Studie zeigt, dass die Anwendung des Handy-Chips die Auswirkungen von EMF auf die EEG-Gehirnaktivität und Aufmerksamkeitsleistung reduziert und somit zur Gehirngesundheit in Arbeitsumgebungen beiträgt, in denen die Nutzung von Mobiltelefonen ein wesentlicher Teil der Arbeit ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse dieser Studie stimmen im Wesentlichen mit denen aus früheren Studien auf dem Gebiet der Neurowissenschaften überein, die die Auswirkungen der EMF-Exposition auf die Gehirnaktivität durch die Nutzung von Mobiltelefonen untersuchen. Die Erhöhungen der EEG-Aktivierungen wurden durch Exposition von EMF durch Mobiltelefone in allen getesteten Frequenzbändern beobachtet. Eine Verringerung dieser EMF-induzierten Aktivierungen wird aufgezeigt, wenn ein Handy-Chip angewendet wird, insbesondere in den Bereichen der Hochfrequenz (Beta- und Gamma-Bänder). Dies wird sowohl im Ruhezustand als auch unter Arbeitsbedingungen beobachtet. Eine tiefergehende Analyse der EEG-Signale zeigt, dass bei der Anwendung des Handy-Chips weniger Aktivierungsquellen im Gehirn beobachtet werden, wenn das Gehirn emittierten EMF von Mobiltelefonen ausgesetzt ist, im Vergleich zu den Versuchsbedingungen mit der Anwendung eines Placebo-Chips oder ohne Chip-Anwendung. Die Ergebnisse dieser Studie ermutigen zu weiteren Untersuchungen zu den langfristigen Auswirkungen der Anwendung von Handy-Chips in Mobiltelefonen in der Arbeitsumgebung, da sie eine positive Wirkung auf die Gehirnaktivität bei einer kurzzeitigen Nutzung von Handy-Chips zeigen.

AUTORENBEITRÄGE

Alle aufgeführten Autoren haben wesentliche, direkte und intellektuelle Beiträge zu der Arbeit geleistet und sie zur Veröffentlichung freigegeben.

FÖRDERUNGEN

Diese Studie wurde von der Stiftung für Gesundheit und Umwelt (SfGU), Berlingen, Schweiz, in Auftrag gegeben.

LITERATURHINWEISE

- Astill, R. G., Piantoni, G., Raymann, R. J. E. M., Vis, J. C., Coppens, J. E., Walker, M. P., et al. (2014). Sleep spindle and slow wave frequency reflect motor skill performance in primary school-age children. *Front. Hum. Neurosci.* 8:910. doi: 10.3389/fnhum.2014.00910
- Borbély, A. A., Huber, R., Graf, T., Fuchs, B., Gallmann, E., and Achermann, P. (1999). Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci. Lett.* 275, 207–210. doi: 10.1016/S0303-3940(99)00770-3
- Brickenkamp, R., Schmidt-Atzert, L., and Liepmann, D. (2010). Test d2-R - Revision. Aufmerksamkeits- and Konzentrationstest [Test d2-R - Revision: attention and concentration test]. Göttingen: Hogrefe.
- Byun, Y.-H., Ha, M., Kwon, H.-J., Hong, Y.-C., Leem, J.-H., Sakong, J., et al. (2013). Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: a longitudinal study. *PLoS ONE* 8:e59742. doi: 10.1371/journal.pone.0059742
- Croft, R. J., Leung, S., McKenzie, R. J., Loughran, S. P., Iskra, S., Hambin, D. L., et al. (2010). Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly. *Bioelectromagnetics* 31, 434–444. doi: 10.1002/bem.20583
- Cui, Y., Ge, Z., Rizak, J. D., Zhai, C., Zhou, Z., Gong, S., et al. (2012). Deficits in water maze performance and oxidative stress in the hippocampus and striatum induced by extremely low frequency magnetic field exposure. *PLoS ONE* 7:e32196. doi: 10.1371/journal.pone.0032196
- D'Andrea, J. A., Ziriak, J. M., and Adair, E. R. (2007). Radio frequency electromagnetic fields: mild hyperthermia and safety standards. *Prog. Brain Res.* 162, 107–135. doi: 10.1016/S0079-6123(06)62007-4
- Divan, H. A., Kheifets, L., Obel, C., and Olsen, J. (2008). Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology* 19, 523–529. doi: 10.1097/EDE.0b013e318175dd47
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., and Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: tests for correlation and regression analyses. *Behav. Res. Methods* 41, 1149–1160. doi: 10.3758/BRM.41.4.1149
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., and Buchner, A. (2007). A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav. Res. Methods* 39, 175–191. doi: 10.3758/BF03193146
- Hinrikus, H., Bachmann, M., Lass, J., Tomson, R., and Tuulik, V. (2008). Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms. *Int. J. Radiat. Biol.* 84, 69–79. doi: 10.1080/09553000701691679
- Huber, R., Graf, T., Cote, K. A., Wittmann, L., Gallmann, E., Matter, D., et al. (2000). Exposure to high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG. *Neuroreport* 11, 3321–3325. doi: 10.1097/00001756-200010200-00012
- Jadidi, M., Firoozabadi, S. M., Rashidy-Pour, A., Sajadi, A. A., Sadeghi, H., and Taherian, A. A. (2007). Acute exposure to a 50 Hz magnetic field impairs consolidation of spatial memory in rats. *Neurobiol. Learn. Mem.* 88, 387–392. doi: 10.1016/j.nlm.2007.07.010
- Kaplan, S., Deniz, O. G., Önger, M. E., Türkmen, A. P., Yurt, K. K., Aydin, I., et al. (2016). Electromagnetic field and brain development. *J. Chem. Neuroanat.* 75, 52–61. doi: 10.1016/j.jchemneu.2015.11.005
- Kaviani Mogadam, M., Firoozabadi, S. M. P., and Janahmadi, M. (2004). "Inhibitory effects of exposure to 50 Hz magnetic field in F1 neuronal soma membrane of *Helix aspersa*," in *Biological Effects of Electromagnetic Fields, 3rd International Workshop, 4–8 October 2004 (Greece)*.
- Klimesch, W., Sauseng, P., Hanslmayr, S., Gruber, W., and Freunberger, R. (2007). Event-related phase reorganization may explain evoked neural dynamics. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 31, 1003–1016. doi: 10.1016/j.neubiorev.2007.03.005
- Koivisto, M., Krause, C. M., Revonsuo, A., Laine, M., and Hämäläinen, H. (2000a). The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory. *Neuroreport* 11, 1641–1643. doi: 10.1097/00001756-200006050-00009
- Koivisto, M., Revonsuo, A., Krause, C., Haarala, C., Sillanmäki, L., Laine, M., et al. (2000b). Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular phones on response times in humans. *Neuroreport* 11, 413–415. doi: 10.1097/00001756-200002070-00038
- Luo, X., Meng, C., Duan, Y., Duan, W., Zhang, H., He, Y., et al. (2016). Chemoprotective action of lotus seedpod procyanidins on oxidative stress in mice induced by extremely low frequency electromagnetic field exposure. *Biomed. Pharmacother.* 82, 640–648. doi: 10.1016/j.biopha.2016.06.005
- Lustenberger, C., Murbach, M., Durr, R., Schmid, M. R., Kuster, N., Achermann, P., et al. (2013). Stimulation of the brain with radiofrequency electromagnetic field pulses affects sleep-dependent performance improvement. *Brain Stimul.* 6, 805–811. doi: 10.1016/j.brs.2013.01.017
- Ohtani, S., Ushiyama, A., Madeda, M., Hattori, K., Kanugita, N., Wang, J., et al. (2016). Exposure time-dependent thermal effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on whole body of rats. *J. Toxicol. Sci.* 41, 655–666. doi: 10.2131/jts.41.655
- Pall, M. L. (2016). Microwave electromagnetic fields produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *J. Clin. Neuroanat.* 75, 43–51. doi: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001
- Papageorgiou, C. C., Nanou, E. D., Tsiafakis, V. G., Kaparelitis, E., Kontoangelos, K. A., Capsalis, C. N., et al. (2006). Acute mobile phone effects on preattentive operation. *Neurosci. Lett.* 397, 99–103. doi: 10.1016/j.neulet.2005.12.001
- Perentos, N., Croft, R. J., McKenzie, R. J., and Cosic, I. (2013). The alpha band of the resting electroencephalogram under pulsed and continuous radio frequency exposures. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 60, 1702–1720. doi: 10.1109/TBME.2013.2241059
- Relova, J. L., Pertega, S., Vilar, J. A., Lopez-Martin, E., Peleteiro, M., and Ares-Pena, F. (2010). Effects of cell-phone radiation on the electroencephalographic spectra of epileptic patients. *IEEE Antennas Propagat. Mag.* 52, 173–179. doi: 10.1109/MAP.2010.5723262
- Sage, C., and Burgio, E. (2018). Electromagnetic fields, pulsed radiofrequency radiation, and epigenetics: how wireless Technologies may affect childhood development. *Child Dev.* 89, 129–136. doi: 10.1111/cdev.12824
- Sienkiewicz, Z. J., Haylock, R. G., Bartrum, R., and Saunders, R. D. (1998). 50 Hz magnetic field effects on the performance of a spatial learning task by mice. *Bioelectromagnetics* 19, 486–493. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1998)19:8<486::AID-BEM6>3.0.CO;2-K
- Stam, R. (2010). Electromagnetic fields and the blood-barrier. *Brain Res. Rev.* 65, 80–97. doi: 10.1016/j.brainresrev.2010.06.001

Stankovic, V., Jovanovic, D., Krstic, D., Markovic, V., and Cvetovic, N. (2017). Temperature distribution and specific absorption rate inside a child's head. *Int. J. Heat Mass Transf.* 104, 559–565. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.094

Suhhova, A., Bachmann, M., Karai, D., Lass, J., and Hinrikus, H. (2013). Effect of microwave radiation on human EEG at two different levels of exposure. *Bioelectromagnetics* 34, 264–274. doi: 10.1002/bem.21772

Zhang, Y., Zhang, Y., Hejuanu, H., Yang, Y., Li, W., and Qian, Z. (2017). Thetagama coupling in hippocampus during working memory deficits induced by low frequency electromagnetic field exposure. *Physiol. Behav.* 179, 135–142. doi: 10.1016/j.physbeh.2017.05.033

Erklärung zu Interessenkonflikten: Die Autoren erklären, dass die Studie unabhängig von kommerziellen oder finanziellen Geschäftsbeziehungen durchgeführt wurde, die als mögliche Interessenkonflikte ausgelegt werden könnten.

Copyright © 2018 Henz, Schöllhorn und Poeggeler. Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bestimmungen der Creative Commons Attribution License (CC BY) veröffentlicht wird. Die Verwendung, Verbreitung oder Vervielfältigung in anderen Foren ist gestattet, sofern der / die ursprüngliche (n) Autor (en) und der / die Copyright-Inhaber (in) in Übereinstimmung mit der anerkannten akademischen Praxis genannt werden und die Originalveröffentlichung dieser Zeitschrift zitiert wird. Eine Verwendung, Verbreitung oder Vervielfältigung ist nicht gestattet, wenn sie diesen Bestimmungen nicht entsprechen.