

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “Impact of specific electromagnetic radiation on wakefulness in mice” by Deng et al. in Proceedings of the National Academy of Sciences (2024)

Kategorie [Hochfrequente Felder, experimentelle Tierstudie]

Spotlight - Jan/2025 no.2 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Wirkungen einer Exposition bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) auf das Elektroenzephalogramm (EEG) des Menschen im Schlaf wurden in mehreren Studien nachgewiesen, aber die Ergebnisse sind immer noch widersprüchlich. Nicht alle Studien zeigen einen Effekt, und die untersuchten Parameter variieren erheblich zwischen den Studien [2]. Die vorliegende Studie [1] untersuchte die Wirkung einer HF-EMF-Exposition auf den Schlaf in einem Mausmodell und befasste sich insbesondere mit dem Einfluss der Trägerfrequenz und der Pulsmodulation.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Deng et al.

In einer früheren Arbeit [3] zeigten die Autoren, dass eine länger anhaltende Ganzkörperexposition (neun Tage) mit HF-EMF mit einer Trägerfrequenz von 2,4 GHz EMF, moduliert durch rechteckige Impulse mit einer Frequenz von 100 Hz und einem Tastverhältnis von 1/8, bei männlichen Mäusen zu einer verlängerten Wachzeit führte. Die Mäuse zeigten eine entsprechende Verkürzung der Dauer des NREM (non rapid eye movement) und REM (rapid eye movement) Schlafs. Im Gegensatz dazu hatte eine längere Exposition mit unmodulierten HF-EMF bei 2,4 GHz mit derselben zeitlich gemittelten Ausgangsleistung keinen Einfluss auf den Schlaf der Mäuse.

In dieser Arbeit untersuchten Deng et al. die Wirkung der Trägerfrequenz (2,4 GHz und 935 MHz), der Modulationsfrequenz (10, 100 und 1000 Hz), der Pulsform (rechteckig oder sinusförmig) und des Tastverhältnisses (1/8 oder kontinuierlich) genauer. Für das Experiment wurde ein Expositionsaufbau verwendet, der aus einem Metallkäfig mit einer rechteckigen Hornantenne bestand, die die Mäuse von oben exponierte. Die Antenne wurde so gespeist, dass eine zeitlich gemittelte Ausgangsleistung von 8 W erreicht wurde, was zu einer Spitzenausgangsleistung von 64 W für die Expositionseinstellungen mit einem Tastverhältnis von 1/8 führte. Für jedes Experiment wurden 12 - 19 exponierte männliche Mäuse oder

Kontrolltiere verwendet. Zwei Wochen vor dem Experiment wurden den Mäusen vier kraniale EEG-Elektroden implantiert und Elektroden für die Elektromyographie (EMG) unter dem Trapez-Muskel angebracht. Die Signale wurden mit einem an den Elektroden befestigten digitalen Kopfaufsatz aufgezeichnet. Die Signale wurden spektral analysiert und in Wachzeit, NREM- und REM-Schlaf eingeteilt. Ein Tag vor Beginn der Exposition wurde eine Baseline aufgezeichnet, und nach dem Ende einer kontinuierlichen HF-EMF-Exposition von neun Tagen wurde eine Aufzeichnung durchgeführt. Die Dauer jeder Aufzeichnung betrug zwölf Stunden während der Lichtphase. Die Dauer von Wachsein, REM- und NREM-Schlaf vor und nach der Exposition wurde statistisch ausgewertet. Mehrfachtestung wurde berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Versuche sowie die Ergebnisse aus einer früheren Studie [3] der Autoren sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Wirkung einer HF-EMF-Expositionen mit einer zeitlich gemittelten Ausgangsleistung von 8 W auf die Dauer der Schlafphasen von männlichen Mäusen, wie von Deng et al. 2024 [1] berichtet. „-“: kein statistisch signifikanter Effekt; „↑“: ein statistisch signifikanter Anstieg; „↓“: eine statistisch signifikante Abnahme in einer der drei von den Autoren durchgeführten statistischen Analysen des jeweiligen Parameters. Die grau unterlegten Ergebnisse stammen aus einer früheren Studie [3].

Trägerfrequenz [GHz]	Tastrate	Modulationsfrequenz [Hz]	Pulsform	Wachzeit	NREM-Schlaf	REM-Schlaf
2.4	1/8	10	rechteckig	-	-	-
2.4	1/8	100	rechteckig	↑	↓	↓
2.4	1/8	1000	rechteckig	↑	↓	↓
2.4	1/8	100	sinusförmig	↑	↓	↓
2.4	keine	100	sinusförmig	-	-	-
0.935	1/8	10	rechteckig	-	↓	-
0.935	1/8	100	rechteckig	-	↓	-
0.935	1/8	1000	rechteckig	-	↓	-
0.935	1/8	100	sinusförmig	↑	-	-
0.935	keine	100	sinusförmig	↑	↓	-

Die Autoren fassen zusammen, dass die Zunahme der Wachzeit und die Abnahme der Schlafdauer nach HF-EMF-Exposition bei Mäusen von der Trägerfrequenz und der Modulationsfrequenz abhängen. Nur für die Trägerfrequenz von 2,4 GHz wurden konsistente Wirkungen (d. h. eine statistisch signifikant erhöhte Wachzeit mit statistisch signifikant verringerter REM- und NREM-Schlafdauer nach Exposition) beobachtet, wobei diese Wirkungen nur bei Modulationsfrequenzen über 10 Hz und bei intermittierender Exposition (Tastverhältnis 1/8) vorhanden waren. Aus diesen Daten schlussfolgern die Autoren, dass die rechteckige und sinusförmige Pulsform ähnliche Wirkungen hervorrufen, aber das Tastverhältnis wichtig für die Auslösung der Wirkungen ist.

Ausgehend von einer geschätzten lokalen spezifischen Absorptionsrate (SAR) von etwa 3 W/kg und im Vergleich zu publizierten Untersuchungen an Computermodellen des menschlichen Kopfes [4] schließen die Autoren, dass die beobachteten Wirkungen nicht thermisch, also ohne eine deutliche Erwärmung des Körpergewebes der Mäuse, entstanden sind. Aus der Beobachtung, dass in vielen Fällen die Wirkungen bei 935 MHz kleiner und nicht konsistent waren im Vergleich zu denen des gleichen Expositionsschemas bei 2,4 GHz, spekulieren die Autoren, dass die Wirkung von HF-EMF für bestimmte Frequenzen empfindliche Strukturen in lebenden Organismen erfordern könnte.

3 Kommentare des BfS

Was die EEG-Aufzeichnungen bei sich frei bewegenden Mäusen betrifft, ist die Studie technisch gut durchgeführt. Es gibt jedoch methodische Mängel, die die Zuverlässigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen können.

Es bleibt unklar, ob die Zuordnung der Mäuse zu den Versuchs- und Kontrollgruppen nach dem Zufallsprinzip erfolgte und ob die Studie vollständig verblindet durchgeführt wurde. Es wurde jedoch kein Unterschied zwischen den Gruppen zu Beginn der Studie festgestellt, und in der früheren Studie [3] wurde die automatische Klassifizierung der EEG-Spektren verblindet überprüft. Die Autoren geben an, dass die Kontrolltiere genauso behandelt wurden wie die exponierten Tiere. Es wird aber nicht beschrieben, ob eine Scheinexposition durchgeführt wurde, bei der die Kontrolltiere für neun Tage in eine ausgeschaltete HF-EMF-Expositionsanlage gesetzt wurden, oder ob es sich um Käfigkontrollen handelte, die bei den gleichen Temperatur- und Lichtverhältnissen wie die exponierten Tiere gehalten wurden.

Die Autoren verwendeten eine Expositionsanlage, die auch in der früheren Studie [3] verwendet und beschrieben wurde. Die angegebenen Details reichen jedoch nicht aus, um die Experimente unabhängig zu reproduzieren. Außerdem bleibt unklar, wie stark die Tiere tatsächlich exponiert wurden. Es gibt Hinweise darauf, dass die Mäuse im reaktiven Nahfeld einer Hornantenne gehalten wurden, was in Kombination mit dem Metallkäfig wahrscheinlich zu einer sehr inhomogenen Exposition führte, die eine zuverlässige Kontrolle und Bewertung der tatsächlichen Expositionsstärke erschwert. In so einem Szenario ist es schwierig, konsistente, genau definierte Versuchsbedingungen zu gewährleisten.

Die angegebenen SAR-Werte wurden mit einem cSAR3D [5] Testsystem ermittelt, welches viel größer als die verwendete Expositionsanlage für die Mäuse ist. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass eine räumliche Anordnung, die zur Bestimmung der SAR verwendet wurde, nicht der tatsächlichen Expositionssituation der Mäuse entsprach. Darüber hinaus kann dieses Testsystem nicht zur Bewertung der SAR bei Mäusen verwendet werden, da es Phantom-Modelle verwendet, die die Geometrie menschlicher Körperteile (z. B. des menschlichen Kopfes) simulieren sollen. Die Ganzkörperabsorption von Mäusen unterscheidet sich deutlich von der lokalen Absorption beim Menschen und hängt stark von der Frequenz ab, mit einem Maximum bei ca. 2000 MHz. Dies könnte eine alternative Erklärung für die beobachteten ausgeprägteren Veränderungen bei einer Frequenz von 2,4 GHz im Vergleich zu 900 MHz sein. Folglich repräsentieren die berichteten SAR-Werte sehr wahrscheinlich nicht die tatsächliche Exposition der Mäuse, und im Gegensatz zur Einschätzung der Autoren können durch Gewebeerwärmung vermittelte thermische Wirkungen nicht ausgeschlossen werden.

Trotz der methodischen Mängel und unabhängig von den möglichen Mechanismen zeigt die Studie durchweg eine Wirkung von pulsmodulierten HF-EMF auf Wachzeit und Schlafdauer bei Mäusen. Es wurde nicht untersucht, ob die Verkürzung der Schlafdauer bei Mäusen Folgen für das Verhalten oder die Gesundheit hat. Bei Menschen haben die bisher in experimentellen Studien beobachteten Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition auf den Schlaf die Schlafqualität nicht beeinträchtigt [6]. Die vorgestellten Ergebnisse könnten zur Erklärung, wie bestimmte Parameter einer HF-EMF-Exposition den Schlaf beeinflussen, beitragen, aber da es bekannte Unterschiede in der Schlaf- und Temperaturregulation bei Nagetieren und Menschen gibt [7], sind sie schwer zu interpretieren.

Referenzen

- [1] Deng H, Liu L, Tang X, et al. Impact of specific electromagnetic radiation on wakefulness in mice. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2024;121(15):e2313903121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2313903121>
- [2] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz). European Union, 2023.
- [3] Liu L, Deng H, Tang X, et al. Specific electromagnetic radiation in the wireless signal range increases wakefulness in mice. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2021;118(31):e2105838118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2105838118>
- [4] Murbach M, Neufeld E, Christopoulou M, Achermann P, Kuster N. Modeling of EEG electrode artifacts and thermal ripples in human radiofrequency exposure studies. *Bioelectromagnetics*. 2014;35(4):273-283. <https://doi.org/10.1002/bem.21837>
- [5] SPEAG. 2023. cSAR3D (SAR testing system). Retrieved from <https://speag.swiss/products/csar3d/>
- [6] Danker-Hopfe H, Dorn H, Bahr A, Anderer P, Sauter C. Effects of electromagnetic fields emitted by mobile phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep. *J Sleep Res*. 2011;20(1 Pt 1):73-81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2010.00850.x>
- [7] Krauchi K, Deboer T. The interrelationship between sleep regulation and thermoregulation. *Front Biosci (Landmark Ed)*. 2010;15(2):604-625. <https://doi.org/10.2741/3636>

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: spotlight@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
[urn:nbn:de:0221-2025011649487](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025011649487)

Spotlight - Jan/2025 no.2 (Deu)