



Bundesamt
für Strahlenschutz

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “Characterization of the core temperature response of free-moving rats to 1.95 GHz electromagnetic fields” by Bala et al. in Bioelectromagnetics (2025)

Kategorie [Hochfrequente Felder, Experimentelle Tierstudie]

Spotlight - Oct/2025 no.3 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Derzeit empfohlene Grenzwerte für Expositionen gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) dienen dazu, Erhöhungen der Körperkerntemperatur (KKT) um mehr als 1 °C zu verhindern [2], da größere Anstiege der KKT zu gesundheitlichen Risiken führen können [3, 4]. Mögliche „nicht-thermische“ biologische Effekte von HF-EMF bei Expositionsniveaus unterhalb dieses Schwellenwerts werden seit Jahrzehnten untersucht. Solche Studien müssen sicherstellen, dass die Exposition die Temperatur der Versuchorganismen nicht nennenswert erhöht.

In diesem *Spotlight on EMF Research*-Beitrag diskutieren wir drei Arbeiten, die darauf abzielen, die KKT bei Labortieren während HF-EMF-Expositionen präzise und zuverlässig zu messen [1, 5, 6]. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Bala et al. [1]. Der präsentierte Ansatz ist für die zukünftige Forschung relevant, um zwischen thermischen und potenziellen nicht-thermischen Effekten von HF-EMF-Expositionen zu unterscheiden.

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

Die vorliegende Studie an Ratten [1] wird im Kontext mit einer vergleichbaren Studie an Mäusen [5] sowie einer technischen Beschreibung einer Modenverwirbelungskammer für HF-EMF-Expositionen [6] betrachtet. Bala et al. heben zunächst die typischen Fehlerquellen bei der Messung der Körperkerntemperatur (KKT) in Studien zu HF-EMF-Expositionen bei Nagetieren hervor. Die KKT wird häufig mittels rektaler Thermometrie kurz vor und nach, jedoch nicht während der HF-EMF-Exposition gemessen. Dieses Vorgehen erfordert das Anfassen und Fixieren der Tiere und verursacht folglich Stress und KKT-Änderungen, die nicht auf die Exposition zurückzuführen sind. Um diese potenzielle Fehlerquelle auszuschließen, können implantierbare Geräte eingesetzt werden. Diese messen die körperinterne Temperatur während der Exposition und übertragen die aufgezeichneten Daten telemetrisch. Da diese Geräte chirurgisch in den Körper der Tiere implantiert werden müssen, muss ausreichend Erholungszeit zwischen dem Eingriff und den Experimenten eingeplant werden. Zusätzlich stellt der Transport der Tiere zum Expositionsraum eine weitere Stressquelle dar, die die KKT erhöhen kann und angemessen berücksichtigt werden muss.

Vor dem Hintergrund dieser potenziellen Fehlerquellen hatten Bala et al. [1] und Sylvester et al. [5] das Ziel, die KKT frei beweglicher Ratten bzw. Mäuse ohne Einflussnahme durch die Forschenden in Echtzeit während einer HF-EMF-Ganzkörperexposition bei einer Frequenz von 1,95 GHz zu messen. Hierzu wurden pro Spezies jeweils zwölf männliche und zwölf weibliche Tiere operiert und ihnen handelsübliche radiotelemetrische Temperaturkapseln (AniPill) in die Bauchhöhle implantiert. Die Ratten waren wenige Wochen, die Mäuse neun Monate alt. Die Nagetiere durften sich etwa zwei Wochen von der Operation erholen, bevor die Experimente begannen. Zur Validierung der AniPill-Messmethode wurden die mit den Temperaturkapseln erfassten KKT-Daten mit zeitgleichen Messungen mittels rektaler Thermometrie bei Mäusen verglichen [5]. Die Daten stimmten gut überein.

Für die Exposition der Nagetiere wurde eine Modenverwirbelungskammer [6] verwendet. Innerhalb eines vordefinierten Arbeitsvolumens dieser Kammer können mehrere frei bewegliche Nagetiere gleichzeitig gegenüber einem statistisch homogenen HF-EMF bei einer Frequenz von 1,95 GHz exponiert werden. Die Umgebungstemperatur in der Kammer wird während der Exposition sowie im Haltungsraum der Tiere vor der Exposition konstant bei 22 °C gehalten [5]. Eine „Leistungsfunktion“ wurde hergeleitet, die die altersabhängige Gesamtmasse aller exponierten Tiere berücksichtigt. Damit kann der Bediener die Eingangsleistung der Kammer berechnen, die erforderlich ist, um die gewünschte ganzkörpergemittelte spezifische Absorptionsrate (wbSAR) zu erreichen. Die Unsicherheiten (entsprechend einem Konfidenzintervall von ca. 95 %) für die wbSAR, die sich aus Mess- und Simulationsunsicherheiten ergeben, wurden auf 3,86 dB für Ratten und 3,89 dB für Mäuse geschätzt. Diese Werte liegen im Bereich der Unsicherheiten vergleichbarer Modenverwirbelungskammern [6]. In Vorversuchen mit Nagetieren und Phantomen wurde außerdem festgestellt, dass die AniPill-Temperaturmessung nicht direkt durch HF-EMF beeinflusst wird und somit unverzerrte sowie gleichmäßige Temperaturmesswerte liefert.

Die Temperaturkapsel zeichnete alle zwei Minuten Daten auf. Während des Transports in die Modenverwirbelungskammer und des Transfers in die Expositionskäfige stieg die KKT bei Ratten um 1 °C und bei Mäusen um bis zu 3 °C an. Daher wurden die Tiere etwa eine Stunde lang akklimatisiert, bis ihre KKT wieder den Normalbereich erreicht hatte. Erst danach wurde die HF-EMF-Exposition begonnen. Temperaturdaten wurden bis zu einer Stunde nach Ende der Exposition aufgezeichnet, um die thermoregulatorische Reaktion der Tiere vollständig zu erfassen. Ratten wurden drei Stunden lang einem HF-EMF ausgesetzt, das zu wbSAR-Werten von 0 (Scheinexposition), 0,1, 0,4 und 4 W/kg führte, während Mäuse zwei Stunden lang einem HF-EMF ausgesetzt wurden, das zu wbSAR-Werten von 0 (Scheinexposition), 1,25, 2,5, 3,75 und 5 W/kg führte. Zum Vergleich wurden bei jeder Expositionssitzung auch Tierphantome mit Temperaturkapseln in der Modenverwirbelungskammer platziert.

Die Temperatur in den Phantomen stieg bei dem höchsten wbSAR-Wert bis zum Ende der Exposition um etwa 3 °C an. Bei Mäusen zeigte sich in den ersten 16 Minuten der Exposition bei wbSAR-Werten von 2,5, 3,75 und 5 W/kg ein statistisch signifikanter Anstieg der KKT um 0,32, 0,24 bzw. 0,37 °C im Vergleich zu den scheinexponierten Mäusen. Dieser Effekt war vorübergehend. Jedoch war die durchschnittliche KKT der Mäuse am Ende der Exposition in der 5 W/kg-Gruppe statistisch signifikant um 0,34 °C höher als die der scheinexponierten Mäuse.

Bei Ratten zeigte nur die 4 W/kg-Expositionsgruppe zu Expositionsbeginn einen statistisch signifikanten Anstieg der KKT um 0,49 °C im Vergleich zu scheinexponierten Ratten. Während der gesamten Expositionsdauer blieb die KKT der Ratten in der 4 W/kg-Gruppe auf einem Plateau-Niveau erhöht und war am Ende der Exposition um 0,62 °C höher als in den scheinexponierten Tieren. Die KKT der Ratten in der 0,4 W/kg-Gruppe war am Expositionsende statistisch signifikant um 0,14 °C höher als die der scheinexponierten Ratten. Nach Beendigung der Exposition erreichte die KKT der Ratten der 4 W/kg-Gruppe nach etwa einer Stunde wieder den Wert der scheinexponierten Gruppe. Die Abkühlrate betrug in den ersten zehn Minuten nach Expositionsende 0,016 °C/Minute.

Sylvester et al. kommen zu dem Schluss, dass Mäuse im Vergleich zu Tierphantomen die erhöhte thermische Belastung durch HF-EMF-Expositionen bei den eingesetzten wbSAR-Werten von bis zu 5 W/kg wirksam kompensieren können. Dies ist vermutlich auf die Aktivierung thermoregulatorischer Mechanismen zurückzuführen. Bala et al. schlussfolgern, dass auch Ratten die zusätzliche thermische Belastung durch die angewandten HF-EMF-Expositionen von bis zu 4 W/kg effektiv kompensieren können, wenn auch weniger effizient als Mäuse. Dies liegt wahrscheinlich am geringeren Verhältnis von Oberfläche zu Masse von Ratten. Da die Handhabung der Tiere zu größeren KKT-Erhöhungen als bei den höchsten Expositionsstufen führte, sollten zukünftige Tierversuche angemessene Akklimatisierungszeiten vor Beginn der Expositionen einplanen.

3 Kommentare des BfS

Die Zielsetzung und Methoden der vorgestellten Studien sind für den Strahlenschutz von großem Wert und hoher Relevanz. Die vorliegenden Arbeiten von Bala et al. und Sylvester et al. zeigen überzeugend, dass unverfälschte Messungen der Körperkerntemperatur (KKT) bei nicht-fixierten Labornagern während HF-EMF-Expositionen durchführbar sind. Die Arbeiten zeigen, dass die durch die Exposition hervorgerufenen durchschnittlichen KKT-Anstiege bei Mäusen auf etwa 0,4 °C bei einer wbSAR von 5 W/kg und bei Ratten auf etwa 0,6 °C bei 4 W/kg begrenzt sind. Indem sie ausreichende Akklimatisierungszeiten gewährten, um die durch Handling und invasive Messungen verursachten stressinduzierten Schwankungen der KKT zu berücksichtigen [7], und dank geeigneter statistischer Testverfahren, konnten sie selbst kleine, durch HF-EMF-Exposition hervorgerufene Anstiege der KKT von etwa 0,15 °C zuverlässig erfassen. Dies steht im Gegensatz zu Studien an Ratten von Kim et al. [8] und Ohtani et al. [9], die ein ähnliches drahtloses Thermometriergerät verwendeten, jedoch entweder keine Veränderung der KKT oder Anstiege von mehr als 1 °C bei einer wbSAR von 4 W/kg berichteten. In diesen Studien wurde jedoch keine Akklimatisierungszeit vor der Exposition vorgesehen; wesentliche Expositionsbedingungen, wie die Umgebungstemperatur, wurden nicht ausreichend dokumentiert [8] oder die Exposition erfolgte bereits wenige Tage nach dem Eingriff, während die Tiere noch am Genesen waren [9].

Das National Toxicology Program (NTP) führte Studien zu toxikologischen und kanzerogenen Effekten von HF-EMF-Expositionen bei Ratten und Mäusen durch. In einer Pilotstudie von Wyde et al. [10] wurde die Körpertemperatur von Tieren gemessen, die intermittierenden (jeweils zehn Minuten an und aus) HF-EMF-Expositionen verschiedener Intensität ausgesetzt waren. Ältere männliche Ratten, deren Körpergewicht mit dem einer schwereren Subgruppe von Ratten bei Bala et al. vergleichbar war, zeigten bei einer wbSAR von 6 W/kg einen statistisch signifikanten Temperaturanstieg von etwa 0,65 °C. Keinen Anstieg fand die NTP-Studie bei einem wbSAR-Wert von 4 W/kg [10, 11], während Bala et al. nach einer halben Stunde Exposition bei 4 W/kg einen Anstieg von etwa 0,5 °C beobachteten. Es gibt mehrere mögliche Erklärungen für den Unterschied zwischen den beiden Studien. Erstens lag aufgrund des intermittierenden Verlaufs der Exposition in der NTP-Studie die durchschnittliche wbSAR lediglich bei 2 W/kg. Zweitens verwendeten Wyde et al. subkutan implantierte Mikrochips, die jedoch nicht die tatsächliche KKT messen. Außerdem erfolgten die Temperaturmessungen ein bis zwei Minuten nach dem Ende der letzten Expositionsphase des intermittierenden Regimes. Dieser Zeitverzug würde laut den Daten von Bala et al. theoretisch zu einer Absenkung der KKT um 0,016 bis 0,032 °C führen. Aufgrund der Unterschiede in den Expositionsbedingungen bleibt jedoch unklar, ob und gegebenenfalls in welchem Ausmaß Wyde et al. die durch die Exposition verursachten Veränderungen der KKT bei älteren männlichen Ratten in der NTP-Studie unterschätzt haben [11].

Bala et al. und Sylvester et al. liefern wertvolle, methodisch validierte Erkenntnisse für die Planung zukünftiger Studien, die die Messung der Körperkerntemperatur bei Labortieren erfordern. Weitere detaillierte Daten zum KKT-Verhalten in Abhängigkeit vom Körpergewicht würden den Erkenntnisgewinn steigern.

Zusammenfassend leisten die vorliegenden Arbeiten einen wichtigen methodischen Beitrag zur HF-EMF-Forschung im Strahlenschutz. Durch die Etablierung standardisierter, genauer und minimalinvasiver Methoden zur Messung der Körperkerntemperatur legen sie die Grundlage für eine zuverlässige Bestimmung und Quantifizierung thermischer Auswirkungen von HF-EMF-Expositionen in Tierversuchen – eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung behaupteter Bioeffekte schwacher HF-EMF-Expositionen. Darüber hinaus ermöglichen die präsentierten Ergebnisse zu den Veränderungen der KKT bei exponierten Mäusen und Ratten eine bessere Interpretation früherer Studien, in denen möglicherweise kein derart stringenter Ansatz mit präziser Temperaturkontrolle verfolgt wurde.

Referenzen

- [1] Bala, N, Croft, RJ, McIntosh, RL, Iskra, S, Frankland, JV, McKenzie, RJ, Deng, C. Characterization of the core temperature response of free-moving rats to 1.95 GHz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2025; 46(5):e70013.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.70013>.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*. 2020; 118(5):483–524.
DOI: <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- [3] Cheshire, WP, Jr. Thermoregulatory disorders and illness related to heat and cold stress. *Autonomic Neuroscience*. 2016; 196:91–104.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.01.001>.
- [4] Rauch, TM, Welch, DI, Gallego, L. Hyperthermia impairs retrieval of an overtrained spatial task in the Morris water maze. *Behavioral and Neural Biology*. 1989; 52(3):321–330.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0163-1047\(89\)90442-1](https://doi.org/10.1016/S0163-1047(89)90442-1).
- [5] Sylvester, E, Deng, C, McIntosh, R, Iskra, S, Frankland, J, McKenzie, R, Croft, RJ. Characterising core body temperature response of free-moving C57BL/6 mice to 1.95 GHz whole-body radiofrequency-electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2024; 45(8):387–398.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22527>.
- [6] Iskra, S, McIntosh, RL, McKenzie, RJ, Frankland, JV, Deng, C, Sylvester, E, Wood, AW, Croft, RJ. The development of a reverberation chamber for the assessment of biological effects of electromagnetic energy absorption in mice. *Bioelectromagnetics*. 2025; 46(1):e22539.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22539>.
- [7] van Bogaert, MJ, Groenink, L, Oosting, RS, Westphal, KG, van der Gugten, J, Olivier, B. Mouse strain differences in autonomic responses to stress. *Genes, Brain and Behavior*. 2006; 5(2):139–149.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1601-183X.2005.00143.x>.
- [8] Kim, HS, Kim, Y, Jeon, SB, Choi, HD, Lee, AK, Lee, HJ, Pack, JK, Kim, N, Ahn, YH. Effect of radiofrequency exposure on body temperature: Real-time monitoring in normal rats. *Journal of Thermal Biology*. 2022; 110:103350.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103350>.
- [9] Ohtani, S, Ushiyama, A, Maeda, M, Hattori, K, Kunugita, N, Wang, J, Ishii, K. Exposure time-dependent thermal effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on the whole body of rats. *Journal of Toxicological Sciences*. 2016; 41(5):655–666.
DOI: <https://doi.org/10.2131/jts.41.655>.
- [10] Wyde, ME, Horn, TL, Capstick, MH, Ladbury, JM, Koepke, G, Wilson, PF, Kissling, GE, Stout, MD, Kuster, N, Melnick, RL, Gauger, J, Bucher, JR, McCormick, DL. Effect of cell phone radiofrequency radiation on body temperature in rodents: Pilot studies of the National Toxicology Program's reverberation chamber exposure system. *Bioelectromagnetics*. 2018; 39(3):190–199.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22116>.
- [11] Kuhne, J, Schmidt, JA, Geschwentner, D, Pophof, B, Ziegelberger, G. Thermoregulatory stress as potential mediating factor in the NTP cell phone tumor study. *Bioelectromagnetics*. 2020; 41(6):471–479.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22284>.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

www.bfs.de

Tel.: +49 30 18333-0
Fax: +49 30 18333-1885
E-Mail: spotlight@bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
[urn:nbn:de:0221-2025101655872](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025101655872)

Spotlight - Oct/2025 no.3 (Deu)