

Zusammenfassung und Bewertung ausgewählter Studien

Im Zeitraum von Mitte Oktober 2022 bis Mitte Januar 2023 wurden 122 neue Publikationen identifiziert, von denen sechs von BERENIS vertieft diskutiert wurden. Vier davon wurden gemäss den Auswahlkriterien als besonders relevant und somit zur Bewertung ausgewählt und werden im Folgenden zusammengefasst.

1) Experimentelle Tier- und Zellstudien

Stress-Antworten und Hormesis bei Ratten durch NF-MF-Exposition (Klimek et al. 2022)

In der experimentellen Tierstudie von Klimek und Kollegen (2022) wurde der Frage nachgegangen, ob es in Ratten Hinweise auf Stress und damit verbundene Stress-Antworten nach mehrfacher Befeldung (50 Hz, 1 mT und 7 mT) gibt. Die Autoren exponierten drei Monate alte männliche Wistar-Ratten dreimal in Abständen von drei Wochen. Jeweils am Ende der Expositionsperioden und dem anschliessenden Stresstest wurden Stresshormone und deren Rezeptoren gemessen, sowie auch das Explorations- und Angstverhalten der Tiere. In dieser Studie stand insbesondere die Stressantwort der Hypophysen-Hypothalamus-Nebennierenachse im Zentrum der Untersuchungen. Hier wird die Produktion von Kortikosteroiden in der Nebenniere beeinflusst durch ein Signal aus der Hypophyse. Hohe Kortikosteroid-Plasmaspiegel signalisieren, dass weniger Kortikosteroide von der Nebenniere produziert werden sollen, da es einen Rückkoppelungsmechanismus zwischen Hypothalamus-Hypophyse und Nebennierenrinde gibt. Die Untersuchungen zeigten, dass das NF-MF die Empfindlichkeit, Stressantworten auszulösen in Abhängigkeit von der Feldstärke/Flussdichte verändert. Während die Ergebnisse bei 1 mT auf eine neuroprotektive Antwort und somit auf therapeutische Effekte und Anxiolyse (verminderte Angst) hinweisen, wurde bei 7 mT das Gegenteil beobachtet. Dies entspricht dem Prinzip der Hormesis (griech.: "Anregung, Anstoß", englisch: adaptive response), einem Phänomen und bereits von Paracelsus formulierten biologischen Effekt, dass geringe Dosen schädlicher oder giftiger Substanzen eine positive Wirkung auf den Organismus haben können. Analog zur Hormesis zeigen die Ergebnisse, dass geringer Stress bei wiederholter Anwendung vor weiteren Stressoren schützt, während stärkerer Stress das Gegenteil bewirkt. Dieser Effekt von NF-MF verschiedener Flussdichten wurde, nach einer Studie in Drosophila-Fliegen, nun zum ersten Mal bei Säugetieren gezeigt.

Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern mit WiFi-Signalen auf das Chromatin von Fruchtfliegen (Cappucci et al. 2022)

In dieser Studie wurde der Einfluss eines HF-EMF (2.436 GHz) auf den Aktivierungszustand und die Struktur des Chromatins (DNS und assoziierte strukturelle Proteine des Zellkerns) in Larven und adulten Fruchtfliegen (*Drosophila melanogaster*) untersucht. In einer geeigneten Expositionsvorrichtung (TEM-Zelle, gekoppelt an einen kommerziellen WiFi-Router) wurden die Fruchtfliegen während ihrer ganzen Entwicklung bis ins Erwachsenenalter einem kontinuierlichen WiFi-Signal (durchschnittliches E-Feld von 1.35 V/m) ausgesetzt und mit Tieren in einer Kontrollzelle mit ca. 13-fach schwächeren Hintergrund-E-Feldern verglichen. Die Autoren berechneten einen SAR-Wert von 60.8 mW/kg für die exponierte Gruppe. In den Köpfen und Ovarien, aber nicht in den Hoden, von 10 Tage alten exponierten Tieren wurde eine erhöhte Expression (Genaktivität) von mobilen Genomsequenzen (Transposons) beobachtet. Solche Aktivierung von Transposons war schon für

andere Zellstressoren wie beispielsweise Hitzeschock bekannt. Wie die Autoren in einem Kontrollexperiment mit Hitzeschock-Behandlung der Fliegen zeigten, ist die Zunahme der Expression von Transposons nach HF-EMF-Exposition aber auf einen anderen Mechanismus zurückzuführen. Die WiFi-Exposition führte zu einer Dekondensation des konstitutiven Heterochromatins (inaktives kondensiertes Chromatin), was sich in einer Abnahme von Biomarkern für inaktives Chromatin (HP1 und Histonmodifikationen) und einer Veränderung von Heterochromatin-abhängiger Geninaktivierung in einem genetischen Testmodell zeigte. In den exponierten Fliegenlarven wurden zudem Anzeichen von Genominstabilität und Chromatin-Dekondensation in sich teilenden Hirnzellen und eine moderate Zunahme von ROS-Bildung in verschiedenen Hirnregionen festgestellt. Im Vergleich zu schein-exponierten Kontrolltieren führte die WiFi-Exposition zu einem reduzierten Bewegungsverhalten von Larven und adulten Fliegen sowie einer verringerten Lichtvermeidung der Larven. Als letztes wurde der Einfluss des HF-EMF auf Tumormetastasenbildung in einem genetischen Modell untersucht und eine Zunahme der Metastasen festgestellt, was die Autoren mit dem Mutationspotential von Transposonaktivierung erklärten.

Die Beobachtungen dieser Studie sind insofern erwähnenswert, da es kaum vergleichbare Untersuchungen bezüglich der Wirkung von EMF auf Heterochromatin gibt. Die repetitiven Genomregionen mit Transposon und viralen Sequenzen, die je nach Organismus einen beträchtlichen Anteil am genetischen Material ausmachen (beim Menschen ca. 40-45%), werden in den Zellen inaktiviert, was Mutationen durch aktive Elemente verhindert. Lange wurden diese als «Junk-DNA» angesehen, da sie keine für die Zellen essentiellen kodierenden Gene enthalten. Heute geht man aber davon aus, dass sie auch strukturelle und genregulierende Funktionen haben. So wurde kürzlich eine Aktivierung von retroviralen Elementen im Heterochromatin in einen Zusammenhang mit der Alterung von Zellen und Organismen gebracht. Insofern könnten die Beobachtungen von Cappucci *et al.* (2022) bezüglich der Dekondensation des Heterochromatins, Aktivierung von Transposons und der beschriebenen Verhaltensveränderungen und der Metastasenzunahme durch Exposition mit HF-EMF einen relevanten Ansatzpunkt für weitergehende Untersuchungen darstellen.

2) Epidemiologische Studien

Analyse des metabolischen Profils von Personen mit Fibromyalgie und elektromagnetischer Empfindlichkeit (Piras et al. 2022)

Das metabolische Profil («Metabolomics») von 31 Studienteilnehmenden (30 Frauen, 1 Mann) mit einer Diagnose von Fibromyalgie und selbstdeklariertes elektromagnetischer Empfindlichkeit (EHS) wurde mit 23 gesunden Teilnehmenden (21 Frauen, 2 Männer) verglichen. Die Metaboliten im Blutplasma wurden mit Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) bestimmt. Neunzehn Metaboliten, die an verschiedenen Stoffwechselwegen beteiligt sind, waren in den zwei Gruppen unterschiedlich. Die Stoffwechselwege betreffen den Energiestoffwechsel, metabolische Prozesse der Muskeln, Abwehr von oxidativem Stress und chronischen Schmerz. Vergleiche der beiden Gruppen mittels H-NMR Spektroskopie wurden bereits früher (Piras *et al.* 2020)¹ beschrieben.

Fibromyalgie wird als generalisiertes Weichteilrheuma definiert, dessen Ursache unbekannt ist. Die Diagnose erfolgt nach validierten Kriterien. Leitsymptom sind chronische Weichteilschmerzen, häufig begleitet von Müdigkeit, Schlafstörungen, kognitiven Beschwerden, Niedergeschlagenheit und Ängstlichkeit. Routinemässig durchgeführte Laboruntersuchungen und Bildgebung sind normal.

¹ Piras C, Conte S, Pibiri M, Rao G, Muntoni S, Leoni VP, Finco G, Atzori L (2020): **Metabolomics and psychological features in fibromyalgia and electromagnetic sensitivity**. Sci Rep. 2020 Nov 24;10(1):20418. doi: 10.1038/s41598-020-76876-8. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33235303/>

Fibromyalgie tritt gehäuft mit anderen funktionellen Erkrankungen auf, zum Beispiel mit Reizdarmsyndrom oder Migräne. EHS-Patientinnen und -Patienten leiden ebenfalls an verschiedenen medizinisch nicht erklärbaren Symptomen. Insofern gibt es Parallelen zwischen der Fibromyalgie und EHS. Interessant aber nicht überraschend und auch nicht neu ist, dass die komplexe Multi-Organ-Symptomatik mit Stoffwechselveränderungen einhergeht. Für die Autoren deuten die Ergebnisse auf eine mögliche metabolische Veränderung bei EHS hin. Diese Schlussfolgerung ist eine Überinterpretation, da Fibromyalgie und EHS gleichzeitig vorliegen, und eine Vergleichsgruppe mit Fibromyalgie ohne EHS fehlt. Die beschriebenen Veränderungen könnten auch durch andere Faktoren verursacht worden sein (z.B. Nahrungsaufnahme, Begleiterkrankungen).

Niederfrequente Magnetfeld-Exposition durch Hochspannungsleitungen in Slowenien und Krebsrisiko bei Kindern und Jugendlichen (Zagar et al. 2023)

Frühere epidemiologische Studien haben gezeigt, dass langfristige Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern, stärker als 0.3 μT , wie sie in Wohnungen in der Nähe von Hochspannungsleitungen auftreten kann, möglicherweise ein Risikofaktor für das Auftreten von Leukämie bei Kindern ist. Die Studie von Zagar *et al.* (2023) hatte einerseits zum Ziel, eine detaillierte landesweite Modellierung der NF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen in Slowenien zu machen und andererseits zu untersuchen, ob eine Wohnlage in der Nähe von Hochspannungsleitungen einen Einfluss auf das Auftreten von Krebs im Allgemeinen, und insbesondere von Leukämie und Gehirntumoren bei Kindern und Jugendlichen hat. Hierzu wurden nationale Krebsregisterdaten über einen Zeitraum von 12 Jahren herangezogen (2005-2016, Krebs in der Altersgruppe 0-14 Jahre, Leukämie in der Altersgruppe 0-19 Jahre, Gehirntumoren in der Altersgruppe 0-29 Jahre). Alle aufgetretenen Fälle wurden hinsichtlich der NF-MF-Exposition am Wohnort in fünf Expositions-kategorien eingeteilt (niedrigste Kategorie: < 0.1 μT , höchste Kategorie: $\geq 0.4 \mu\text{T}$, drei Zwischenkategorien im Bereich von 0.1 – 0.4 μT). In die Expositions-kategorie unterhalb von 0.1 μT fielen 99.5 % der untersuchten Bevölkerung und insgesamt 516 Krebsfälle. Nur 0.5% der Kinder und Jugendlichen in Slowenien wohnten an Orten, an denen die durchschnittliche NF-MF-Exposition 0.1 μT oder mehr betrug. Nur 0.09% aller Kinder wohnten für wenigstens 1 Jahr in einer mit mehr als 0.4 μT belasteten Zone. In der Kategorie 0.1-0.2 μT trat ein Leukämie-Fall auf, und in der Kategorie 0.2-0.3 μT ein Gehirntumorfall. Keine Erkrankungen wurden oberhalb von 0.3 μT beobachtet. In ihrer Analyse verglich die Autorengruppe die aufgetretenen Fallzahlen mit den zu erwartenden Fallzahlen. Hierbei wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Krebsrisiko bei höher exponierten Kindern und Jugendlichen im Vergleich zu den übrigen Gleichaltrigen festgestellt.

Eine Stärke der Studie ist die gute Expositionsmodellierung mithilfe von hochaufgelösten Stromflussdaten der Stromversorger. Jedoch sind hausgemachte Quellen (Hausleitungen, elektrische Geräte) damit nicht erfasst. In der Analyse wurden keine Störgrößen (Confounder) berücksichtigt, jedoch sind in dieser Altersklasse auch keine relevanten Störgrößen bekannt. Die Studie demonstriert anschaulich die Schwierigkeiten bei der Erforschung dieser Fragestellung. Krebsfälle bei Kindern und Jugendlichen sind naturgemäss relativ selten und nur ein sehr kleiner Teil der Bevölkerung ist am Wohnort hohen NF-MF ausgesetzt. Die statistische Aussagekraft einer einzelnen Studie wie dieser ist deshalb sehr eingeschränkt. Umgekehrt zeigt die Studie, dass auch bei einer angenommenen Verdoppelung des Krebsrisikos durch NF-MF die Anzahl zusätzlich zu erwartender Krebsfälle klein wäre, weil nur ein kleiner Teil der Bevölkerung Intensitäten oberhalb der Verdachtsschwelle ausgesetzt ist.

3) Weitere Publikationen zur Information

Computergestützte Modellierung von Exposition durch 5G-Netztopologien in der Schweiz

Castellanos *et al.* (2022)² haben eine Studie veröffentlicht, die basierend auf rechnergestützten Modellierungen verschiedene 5G-Netztopologien in der Schweiz im Hinblick auf EMF-Exposition, Verbindungsqualität und Nachhaltigkeit bewertet.

EU-Bericht zum Gesundheitsrisiko von HF-EMF

Im Auftrag der EU wurde vom *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* (SCHEER) ein Bericht zum Gesundheitsrisiko von HF-EMF erstellt. Nachdem die vorläufige Fassung von August bis September 2022 zunächst zur öffentlichen Diskussion gestellt worden war, ist im Juni 2023 der vollständige Bericht veröffentlicht worden³.

Literaturangaben

Cappucci U, Casale AM, Proietti M, Marinelli F, Giuliani L, Piacentini L (2022): **WiFi Related Radiofrequency Electromagnetic Fields Promote Transposable Element Dysregulation and Genomic Instability in *Drosophila melanogaster***. *Cells*. 2022 Dec 13;11(24):4036. doi: 10.3390/cells11244036. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36552798/>

Klimek A, Kletkiewicz H, Siejka A, Wyszowska J, Maliszewska J, Klimiuk M, Jankowska M, Seckl J, Rogalska J (2022): **New view on the impact of the low-frequency electromagnetic field (50 Hz) on stress responses - hormesis effect**. *Neuroendocrinology*. 2022 Nov 2. doi: 10.1159/000527878. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36323227/>

Piras C, Pibiri M, Conte S, Ferranti G, Leoni VP, Liggi S, Spada M, Muntoni S, Caboni P, Atzori L (2022): **Metabolomics analysis of plasma samples of patients with fibromyalgia and electromagnetic sensitivity using GC-MS technique**. *Sci Rep*. 2022 Dec 19;12(1):21923. doi: 10.1038/s41598-022-25588-2. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36535959/>

Zagar T, Valic B, Kotnik T, Korat S, Tomsic S, Zadnik V, Gajsek P (2023): **Estimating exposure to extremely low frequency magnetic fields near high-voltage power lines and assessment of possible increased cancer risk among Slovenian children and adolescents**. *Radiol Oncol*. 2023 Jan 8. doi: 10.2478/raon-2023-0002. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36609540/>

² Castellanos G, De Gheselle S, Martens L, Kuster N, Joseph W, Deruyck M, Kuehn S (2022): **Multi-objective optimisation of human exposure for various 5G network topologies in Switzerland**. *Comput Netw* 2022; 216: 109255. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109255>

³ SCHEER (2023): **Opinion on the need of a revision of the annexes in Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz)**. Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks, adopted by written procedure on 18 April 2023. https://health.ec.europa.eu/consultations/scheer-public-consultation-preliminary-opinion-scientific-evidence-radiofrequency_en

Kontakt

Dr. Stefan Dongus
Sekretariat BERENIS
Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut
Department Epidemiology and Public Health
Environmental Exposures and Health Unit
Kreuzstrasse 2, 4123 Allschwil
Tel: +41 61 284 8111
E-Mail: stefan.dongus@swisstph.ch

Weitere Informationen:

[Beratende Expertengruppe nicht-ionisierende Strahlung \(BERENIS\)](#)

[Abkürzungsverzeichnis \(als pdf\)](#)