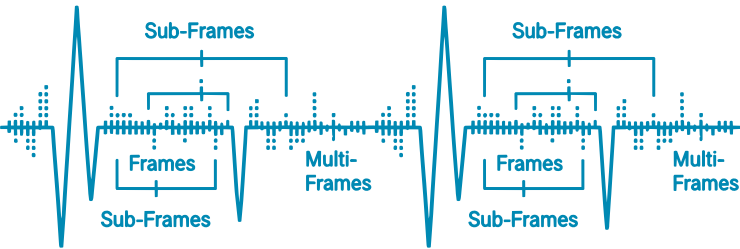


ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer
Felder für Umwelt und Gesundheit



Wieviel Niederfrequenz steckt in drahtloser Kommunikation?

Aufzeichnung der extrem niederfrequenten Pulsation elektromagnetischer Felder drahtloser Kommunikation

Panagopoulos DJ, Litovsky R, Chamberlin K (2026). Recording the extremely low frequency pulsations of wireless communication electromagnetic fields. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/15368378.2026.2654072>

Reale Mobilfunk- und WLAN-Signale werden in der wissenschaftlichen Literatur oftmals als hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) charakterisiert. Diese Einordnung erfasst jedoch nur einen Teil der physikalischen Realität. Sämtliche Signale drahtloser Kommunikationstechnologie (Mobiltelefonie, WLAN, DECT, Bluetooth) werden diskontinuierlich in Form von Ein-/Aus-Pulsen (auch „Frames“, „Multi-Frames“, „Sub-Frames“ etc.) ausgesendet. Das eigentlich hochfrequente Trägersignal wird mit extrem niederfrequenten (ELF: 3-3000 Hz) oder sehr niederfrequenten (VLF: 3-30 kHz) Wiederholungsraten emittiert. Zudem unterliegt die Signalamplitude einer hohen Variabilität im ultra-niederfrequenten Bereich (ULF: 0-3 Hz). Die Hinweise darauf, dass diese niederfrequente Signal-Modulierung für die biologische Wirksamkeit realer Drahtloskommunikation entscheidend sein könnte, mehren sich. Dieser

Impressum

ElektrosmogReport Ausgabe 02/2026, 32. Jahrgang

Online Veröffentlichung auf www.EMFdata.org

Bestellung Printausgabe:

shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport, Bestellnr. 52602

Redaktion ElektrosmogReport

Roman Heeren (RH), M.Sc. | Alain Thill (AT), M.Sc.

Herausgeber und V.i.S.d.P.

Diagnose-Funk e.V. | Postfach 15 04 48 | D-70076 Stuttgart

kontakt@diagnose-funk.de

Spendenkonto:

Diagnose-Funk e.V. | IBAN: DE39 4306 0967 7027 7638 00

BIC: GENODEM1GLS | GLS Bank

Ermöglichen Sie mit Ihrer Spende die Aufarbeitung und Analyse der Forschungslage und die weitere Herausgabe des ElektrosmogReport.

INHALTSVERZEICHNIS

SEITE

01 > Niederfrequenz in drahtloser Kommunikation

03 > HF schädigt Testosteronbildner

04 > HF-bedingter oxidativer Stress in Testosteronbildnern

05 > Schlüsselmechanismus identifiziert: EMF als Genschalter

07 > EMF stört Angstzentrum

08 > EMF, Mikrotubuli und Krebstherapie

09 > EMF, Mikrotubuli und Gehirn

11 > Aktuelle Grenzwerte zu hoch

12 > Schlafstörungen auf dem Vormarsch

13 > Hochspannung und Gesundheit

14 > 900 MHz und Verhalten von Honigbienen

15 > EMF und Pflanzen

Zusammenhang wird jedoch von der aktuellen Risikobewertung der Gesundheitsbehörden vollständig ignoriert. Die vorliegende Publikation zeichnet die ELF-Pulsation handelsüblicher Drahtlosgeräte, WLAN-Router, Mobiltelefon mit LTE (4G) und New Radio (5G) im zeitlichen Verlauf auf.

Studiendesign und Durchführung:

Die Wissenschaftler verwendeten eine Breitband-UWB-Spiralantenne, verbunden mit einem Hochfrequenz-Spektrumsanalysator, kalibriert auf die jeweilige Trägerfrequenz (2,45 GHz für WLAN, 840 MHz für 4G, 1876 MHz für 5G). Durch einen sogenannten „Zero-Span“-Modus wurde der Spektrumsanalysator als Oszilloskop betrieben, was die ausgesendete Leistung in Abhängigkeit der Zeit darstellt. Als Emissionsquellen dienten ein kommerzieller WLAN-Router (TP-Link, WiFi 6) bei aktivem Videostreaming sowie ein kommerzielles Mobiltelefon (Apple iPhone 15, entweder im 4G- oder 5G-Modus) während eines Telefongesprächs. Der Abstand der Antenne zum WLAN-Router betrug 1 m, der zum Mobiltelefon 10 cm. Je Messbedingungen wurden 10 Aufzeichnungen erstellt. Die Hintergrundmessung erfolgte bei abgeschalteten Emissionsquellen.

Ergebnisse:

Die Trägerfrequenz des WLAN-Routers wurde mit einer Wiederholungsfrequenz von ca. 10 Hz (5-20 Hz) gepulst, die Pulsamplitude lag ca. 20 dB über dem Hintergrundrauschen. Das 4G-Signal des iPhones wies eine „hierarchische“ Pulsstruktur auf. „Sub-Frames“ (ca. 500 Hz) waren in „Frames“ (ca. 100 Hz) enthalten, zusammengefasst zu „Multi-Frames“ (ca. 3 Hz). Die Pulsamplituden lagen 40-53 dB über dem Hintergrundrauschen. Das 5G-Signal des iPhones zeigte ein ähnliches Bild. „Sub-Frames“ mit ca. 500 Hz in „Frames“ mit ca. 100 Hz und „Multi-Frames“ mit ca. 13 Hz. Die Amplituden lagen hierbei 40-45 dB über dem Hintergrund. In allen gemessenen Signalen wurde eine Variabilität in Amplitude, Dauer und Wiederholungsfrequenz der Pulse beobachtet. Neben der beschriebenen UWB-Spiralantenne wurden ähnliche Messungen mit einer Vivaldi-Hornantenne durchgeführt, die Ergebnisse waren vergleichbar.

Schlussfolgerungen:

Die Studie belegt messtechnisch eindeutig, dass alle untersuchten Kommunikationssignale ELF-Pulsbestandteile aufweisen, die an sich in Bezug auf Amplitude, Wiederholungsfrequenz, Dauer, Verlauf etc. stark variieren. Laut den Autoren trüge die hohe Variabilität der realen Kommunikationssignale im Niederfrequenzbereich, in Kombination mit der Tatsache, dass sie vollständig polarisiert und kohärent sind, entscheidend zu der Bioaktivität der Drahtloskommunikation bei. Lebende Organismen seien nicht in der Lage, sich an stark variable, polarisierte und kohärente Stressoren anzupassen. Als vermittelnden Mechanismus benennen die Wissenschaftler die Ionen-Oszillation an spannungsgesteuerten Ionenkanälen. Dieser sei für die

nicht-thermische, biologische Wirksamkeit von Mobilfunk und WLAN verantwortlich und nicht die unmodulierte hochfrequente Trägerwelle.

Anmerkungen der Redaktion:

Die Publikation liefert direkte Zeitbereichsmessungen der niederfrequenten Pulsstruktur von handelsüblichen WLAN-, 4G- und 5G-Geräten. Die Messungen sind methodisch nachvollziehbar und reproduzierbar. Die messtechnische Stärke liegt in der Nutzung des Zero-Span-Modus als Niederfrequenzoszilloskop. Als methodische Einschränkung ist die Auflösungsbandbreite des Spektrumanalysators zu nennen, die zu einer gelegentlichen Verminderung der Amplitude des Signals führt. Obwohl eindeutig definiert, verwenden die Autoren nicht die ITU-Nomenklatur für die Frequenzbereiche. ITU-konform wäre ULF als der Bereich von 300–3000 Hz definiert, 0,3–3 Hz entsprächen TLF. Der Bereich von 3–300 Hz wäre in ELF (3–30 Hz) und SLF (30–300 Hz) unterteilt. Die Identifikation der Niederfrequenz-Komponenten als Mediator der biologischen Wirksamkeit ist kohärent mit den Befunden der Studien von Jangid et al. (1) (2) in dieser Ausgabe des EREP (02/26), welche reale Kommunikationssignale als wirksamer beschreiben als generische unmodulierte HF-Wellen. In der ebenfalls in dieser Ausgabe des EREP rezensierten Publikation von Kim et al. (3) wird der molekulare Mechanismus identifiziert, wie Niederfrequenz die Expressionsrate von Genen verändern kann. Auch wenn sich die mechanistischen Zusammenhänge von Experiment (Kim) und Modell (Panagopoulos) unterscheiden, spielen bei beiden Ionen-Oszillationen und spannungsgesteuerte Ionenkanäle eine Schlüsselrolle. Die regulatorischen Konsequenzen sollten auf der Hand liegen. Grenzwerte, die auf thermischen Effekten und der spezifischen Absorptionsrate (SAR) beruhen, sind für die Risikobewertung gepulster Felder ungeeignet. Eine Neubewertung unter expliziter Berücksichtigung des identifizierten Wirkmechanismus ist unabdingbar (RH).

1. Jangid P, Rai U, Sevak JK, Ranjan R, Singh S, Singh R (2026). Radiofrequency radiation-induced changes in Leydig cell function. *Scientific Reports*, Mar 25. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39244-6>
2. Jangid P, Rai U, Sevak JK, Singh S, Singh R (2026). Cellular redox disruption and apoptosis: Differential effects of RFR frequencies on Leydig cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 511, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2026.117807>
3. Kim J, Hwang Y, Kim S, Kwon D, Park J, Cho B et al. (2026). Electromagnetic field-inducible *in vivo* gene switch for remote spatiotemporal control of gene expression. *Cell*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2026.03.029>



HF schädigt Testosteronbildner

Durch Hochfrequenz induzierte Veränderungen der Leydig-Zellfunktion

Jangid P, Rai U, Sevak JK, Ranjan R, Singh S, Singh R (2026). Radio-frequency radiation-induced changes in Leydig cell function. *Scientific Reports*, 16, 14999. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39244-6>

Als primäre Testosteron-Synthetisanten sind Leydig-Zellen für die männliche Fruchtbarkeit von großer Bedeutung. Eine Schädigung dieser Zellen kann die Spermatogenese kompromittieren und zu einer Dysfunktion der Hoden führen. Obwohl eine wachsende Anzahl von Studien darauf hinweist, dass hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) oxidativen Stress, mitochondriale Dysfunktionen und Spermienanomalien induzieren können, ist der Wissensstand zur direkten Wirkung auf Zellzyklusregulation und Proliferation von Leydig-Zellen dünn. Diese Lücke adressiert die vorliegende Arbeit, die zudem frequenz- und zeitabhängig untersucht.

Studiendesign und Durchführung:

Die murine TM-3-Leydig-Zellenlinie wurde von den Autoren unter nicht-thermischen Bedingungen in vitro drei unterschiedlichen HF-Quellen ausgesetzt: einem kommerziellen 4G-Mobiltelefon (Xiaomi Note 7; 2318 MHz; 9,25 V/m), einem aus einem Signalgenerator stammenden unmodulierten 1800-MHz-Feld (kontinuierliche Welle; 14,69 V/m) und einem ebenfalls aus einem Signalgenerator stammenden unmodulierten 2450-MHz-Feld (kontinuierliche Welle; 13,44 V/m). Der SAR-Wert für das Mobiltelefon wurde auf 0,5 W/kg beziffert. Als Kontrollen wurden scheinbefeldete Zellen genutzt. Die Befeldungsdauern betragen 15, 30, 45, 60, 90 und 120 Minuten. Die Temperaturunterschiede zwischen befeldeten Zellen und Kontrollen betragen weniger als 0,1 °C. Das elektrische Feld wurde mittels Narda-520-System überwacht. Die Wissenschaftler untersuchten morphologische Veränderungen (Mikroskopie), Zellproliferation bzw. DNA-Synthese (BrdU-ELISA) und Zellzyklus (Durchflusszytometrie). Alle Experimente wurden unabhängig dreifach wiederholt (n = 3). Die statistische Auswertung umfasste ein- und zweifaktorielle ANOVA mit Dunnett-Korrektur.

Ergebnisse:

Alle Hochfrequenz-Quellen führten zu frequenz- und zeitabhängigen morphologischen Anzeichen für zellulären Stress. Diese beinhalteten Zellrunden, Adhärenzverlust und verminderte Zelldichte (ein Anzeichen für das Absterben der Zellen). Die stärksten und frühesten Auswirkungen wurden bei 2450 MHz beobachtet, gefolgt vom 4G-Mobiltelefon und den 1800 MHz. Damit übereinstimmend zeigte der BrdU-Assay eine progres-

sive Verminderung der DNA-Synthese als Maß für die Zellteilung. Beim Mobilfunk war die bereits ab 45 Minuten statistisch signifikant, bei der 1800-MHz-Befeldung ab 60 Minuten und bei der 2450-MHz-Befeldung ab 90 Minuten. Die stärkste Verringerung der relativen Zellteilung zeigte jedoch die 2450-MHz-Befeldung auf unter 50 % nach 90 und 120 Minuten. Die Zellzyklusanalyse ergab konsistent eine Akkumulation der Zellpopulation in der G1-Phase bei gleichzeitiger Abnahme der S-Phase. G2/M-Anteile blieben über alle Bedingungen unverändert. Dies weist auf einen Zellzyklus-Arrest in der G1-Phase hin.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine nicht-thermische Hochfrequenzbefeldung, unter anderem mit einem kommerziellen Mobiltelefon, Morphologie, Zellteilung und Zellzyklus von Leydig-Zellen in vitro beeinflussen kann. Diese Beeinflussung erfolgte in frequenz- und dosis-wirkungs-abhängiger Weise. Die koinzidierenden Befunde aus BrdU-Assay und Zellzyklusanalyse weisen hierbei auf eine sequenzielle Schädigung hin. Die DNA-Replikation wird funktionell gehemmt, was sich anschließend als Zellzyklus-Arrest in der G1-Phase manifestiert. Als mechanistische Grundlage diskutieren die Autoren oxidativen Stress, da sie in einer früheren Studie verminderte Zellproliferation und Testosteronproduktion einhergehend mit erhöhten reaktiven Sauerstoffspezies nach HF-Exposition beobachteten.

Anmerkungen der Redaktion:

Die Stärken der vorliegenden Studie liegen in der kontrollierten nicht-thermischen Versuchsdurchführung, inklusive unabhängig verifizierter Expositionsparameter sowie der statistisch robusten Versuchswiederholung. Besonders hervorzuheben ist die systemische Kohärenz der DNA-Synthese- und Zellzyklus-Analyse, die die Hypothese des progressiven Replikationsstresses unterstützt. In einer weiteren aktuellen Studie der Arbeitsgruppe, ebenfalls besprochen in dieser Ausgabe, dem EREP 02/26 wird die Auswirkung der verschiedenen Hochfrequenzquellen auf das Redox-System der Leydig-Zellen untersucht (vgl. „Störung des zellulären Redoxgleichgewichts und Apoptose: Unterschiedliche Auswirkungen von HF-Frequenzen auf Leydig-Zellen“ (1)), was einen Beitrag zur Aufklärung der mechanistischen Hintergründe der vorliegenden Studie leistet. Bemerkenswert ist, dass das kommerzielle Mobiltelefon trotz geringerer Feldstärke beinahe durchgehend schädlichere Wirkungen erzeugt als der Signalgenerator bei 1800 MHz. Im Falle der Zellproliferation verursacht das Mobiltelefon bei der kürzesten Befeldungsdauer statistisch signifikante Wirkungen. Dies weist darauf hin, dass reale modulierte Mobilfunksignale eine stärkere biologische Wirksamkeit aufweisen als generische kontinuierliche Wellen. Als Limitationen sind u. a. die Verwendung einer in vitro-Zelllinie zu nennen, was die Übertragbarkeit

auf primäre Zellen oder in-vivo-Modelle einschränkt. Die Studie bestätigt die Ergebnisse früherer Studien (im ElektrosmogReport rezensiert), die schädliche Auswirkungen von Hochfrequenz auf die Testosteronbildung beschreiben (2-4). (RH)

1. Jangid P, Rai U, Sevak JK, Singh S, Singh R (2026). Cellular redox disruption and apoptosis: Differential effects of RFR frequencies on Leydig cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 511, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2026.117807>
2. Miao X, Lin Y, Guo J, Lin J, Gao P, Zhang W et al. (2025). Differential metabolic responses of mouse Leydig and spermatogonia cells to radiofrequency electromagnetic field exposure. *Frontiers in Public Health*, 13, 1623701. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1623701>
3. Kaur P, Rai U, Singh R (2023). Genotoxic risks to male reproductive health from radiofrequency radiation. *Cells*, 12(4), 1-20. <https://doi.org/10.3390/cells12040594>
4. Maluin SM, Jaffar FHF, Osman K, Zulkefli AF, Mat Ros MF, Ibrahim SF (2024). Exploring edible bird nest's potential in mitigating Wi-Fi's impact on male reproductive health. *Reproductive Medicine and Biology*, 23(1), 1-13. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12606>



HF-bedingter oxidativer Stress in Testosteronbildnern Störung des zellulären Redoxgleichgewichts und Apoptose: Unterschiedliche Auswirkungen von HF-Frequenzen auf Leydig-Zellen

Jangid P, Rai U, Sevak JK, Singh S, Singh R (2026). Cellular redox disruption and apoptosis: Differential effects of RFR frequencies on Leydig cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 511, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2026.117807>

Als Testosteronproduzenten sind Leydig-Zellen für die Aufrechterhaltung der Spermatogenese unverzichtbar. Die zunehmenden Erkenntnisse über schädliche Auswirkungen von Hochfrequenz auf die männliche Fruchtbarkeit weisen auf oxidativen Stress und Apoptose als zentrale pathologische Mechanismen hin. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine systematische, frequenzvergleichende Untersuchung der Auswirkungen von Hochfrequenz auf Redoxgleichgewicht und Apoptose in Leydig-Zellen durchzuführen.

Studiendesign und Durchführung:

Die Studie wurde an der murinen TM3-Leydig-Zelllinie durchgeführt. Diese wurde drei unterschiedlichen Hochfrequenz-Quellen ausgesetzt: einem 4G-Mobiltelefon (Xiaomi Note 7; 2318 MHz), einem Signalgenerator bei 1800 MHz (kontinuierliche Welle) und einem Signalgenerator bei 2450 MHz (kontinuierliche Welle). Die Befeldungsdauern der Zellkulturen betragen 15, 30, 45, 60, 90 und 120 Minuten (vergleiche „Durch Hochfrequenz induzierte Veränderungen der Leydig-Zellfunktion“ in derselben EREP-Ausgabe 02/26, das grundlegende Studiendesign ist identisch, Anm. d. Red.). Temperatureffekte wurden ausgeschlossen. Als Marker für oxidativen Stress wurden Stickoxid und Superoxid quantifiziert. Die Apoptose der Zellen wurde durch eine Annexin-V-FITC/Propidiumiodid-Doppelmarkierung mit anschließender Durchflusszytometrie bestimmt, was die Erfassung von früh- und spätapoptotischen Fraktionen möglich macht. Alle Experimente wurden dreifach unabhängig wiederholt (n = 3). Die statistische Auswertung umfasste ein- und zweifaktorielle ANOVA mit Dunnett-Korrektur.

Ergebnisse:

Die Konzentration der Stickoxide zeigt ein frequenzspezifisches, biphasisches Muster. Im Falle des Mobiltelefons als Befeldungsquelle wird ein statistisch signifikanter Anstieg nach 30 und 45 Minuten beobachtet, gefolgt von einem transienten Abfall und erneutem statistisch signifikantem Anstieg nach 120 Minuten. Bei der generischen 1800- und 2450-MHz-Befeldung werden jedoch kaum statistisch signifikante Steigerungen des Stickoxid-Gehalts beobachtet, sondern signifikante Verringerungen nach 15 min (beide), 30 min (1800 MHz) und 90 min (1800

MHz). Die intrazellulären Superoxid-Spiegel stiegen unter allen drei Bedingungen progressiv an, wobei Mobilfunk und 2450 MHz eine frühere und ausgeprägtere Akkumulation zeigten als 1800 MHz. Bei allen Befeldungsquellen bzw. Frequenzen wurde eine progressive, statistisch signifikante Zunahme der gesamt-apoptischen Zellen beobachtet. Bei Mobiltelefon und 2450 MHz war hierbei der überwiegende Teil der Zellen frühapoptotisch, während die 1800-MHz-Befeldung hauptsächlich spätapoptotische Zellen erzeugte.

Schlussfolgerungen:

Die Studie weist darauf hin, dass hochfrequente elektromagnetische Felder verschiedener Quellen bzw. Frequenzen in TM3-Leydig-Zellen die Redoxbalance stören und Apoptose induzieren kann. Die frequenz- bzw. quellenabhängigen Unterschiede könnten wiederum auf distinkte Signalwege hinweisen, über die die Hochfrequenz wirkt. Das biphasische Muster könnte auf eine adaptive Antwort mit anschließender Erschöpfung der Schutzmechanismen hindeuten. Die Autoren diskutieren einen mitochondrialen ROS-Austritt (reaktive Sauerstoffspezies) mit konsekutiver Peroxynitritbildung, Lipidperoxidation und Aktivierung apoptotischer Kaskaden als grundlegenden Mechanismus.

Anmerkungen der Redaktion:

Die „Schwesterstudie“ zu der ebenfalls in dieser Ausgabe des EREP besprochenen Studie der Arbeitsgruppe (siehe S. 03) überzeugt durch das in der zugehörigen Rezension beschriebene Studiendesign. Dabei weisen die Beobachtungen eine hohe Kohärenz auf, was mechanistische Grundlage (oxidativer Stress/ Apoptose) und biologische Wirkung (verminderte Testosteronproduktion) anbelangt. Die stärkere biologische Wirkung der höheren Frequenzen bzw. modulierten Frequenz (Mobiltelefon) korreliert mit den beschriebenen Mustern des Redox- bzw. Apoptosesystems. Als Limitation ist zu nennen, dass mitochondriale Funktionsparameter (Membranpotential, ATP-Produktion oder Cytochrom-C-Freisetzung) nicht überprüft wurden, obwohl dies von den Autoren als möglicher Mechanismus identifiziert wurde. Außerdem erfolgte keine detaillierte Beschreibung von Befeldungsaufbau und Dosimetrie, sodass von den Begebenheiten in der „Schwesterstudie“ ausgegangen werden muss. (RH)



Schlüsselmechanismus identifiziert: EMF als Genschalter

Ein durch elektromagnetische Felder induzierbarer in-vivo-Genschalter zur räumlichen und zeitlichen Regulierung von Genexpression

Kim J, Hwang Y, Kim S, Kwon D, Park J, Cho B et al. (2026). Electromagnetic field-inducible in vivo gene switch for remote spatiotemporal control of gene expression. *Cell*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2026.03.029>

Dass elektromagnetische Felder (EMF) die Expression bestimmter Gene modulieren können, ist seit Jahren Gegenstand experimenteller Forschung, bislang jedoch ohne befriedigende mechanistische Erklärung. Die Autoren der vorliegenden Publikation schließen diese Wissenslücke. Auf der Suche nach einem präzisen Steuerungsmechanismus für gentherapeutische Anwendungen identifizieren sie das Protein Cytochrom b5 Typ B (Cyb5b) als wahrscheinlichen Sensor und beschreiben erstmals den molekularen Mechanismus, wie niederfrequente EMF direkt auf die Genexpression und damit zelluläre Regulationsprozesse einwirken. Obwohl aus einem medizinisch/therapeutischen Ansatz erwachsen, besitzt diese Arbeit aus Sicht der Redaktion immense Implikationen für den Strahlenschutz.

Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren identifizierten mittels RNA-Einzelzell-Sequenzierung (sCRNA-seq) in murinen Hirnzellen nach ELF-EMF-Befeldung (2,0 mT; 60 Hz) das Gen *Lgr4* als einziges Gen, dessen Expression konstant, reversibel und gewebeübergreifend durch das EMF verändert wird. Aus der Promotor-Region dieses Gens extrahieren Sie ein EMF-induzierbares Element (IE). In einem Reporter-Assay (transgenes IE-gekoppeltes GFP (grün fluoreszierendes Protein)) identifizieren sie das Cyb5b als essenziellen Mediator, dessen Ausschaltung die EMF-Antwort der Zellen vollständig aufhob und dessen Wiederanschaltung sie vollständig wiederherstellte. Davon ausgehend überprüften die Wissenschaftler die molekularen Zusammenhänge, wie Cyb5b die EMF-Antwort vermittelt, durch Echtzeit-Zell-Bildgebung. Dabei wird deutlich, dass ein durch den spannungsgesteuerten Kalziumkanal *Cacna1f* vermittelter rhythmisch oszillierender Ca^{2+} -Einfluss die IE-Aktivierung verursacht. Die Autoren validieren im Anschluss ihren „Genschalter“ in-vivo mit transgenem Ei-GFP sowie verschiedenen therapeutischen IE-Transgenen im Mausmodell. Dabei modulieren sie gezielt durch das beschriebene ELF-EMF (2,0 mT; 60 Hz) auf gentherapeutische Weise im Mausmodell Alzheimer-Phänotypen und Serotonin-Funktion in Depressions-Phänotypen.

Ergebnisse – der Mechanismus:

Das für den Strahlenschutz relevante Kernstück der Studie ist die mechanistische Entschlüsselung der EMF-Signalkette. Eine ganze Reihe verschiedener Reporter- und Knock-out-Assays weisen robust darauf hin, dass Cyb5b, ein sich hauptsächlich in der mitochondrialen Membran befindlicher membrangebundener Elektronenüberträger, als EMF-Sensor fungiert. Das verwendete ELF-Feld induziert eine Aktivitätsänderung von Cyb5b, welches den Redoxstatus von spannungsgesteuerten Kalziumkanälen (VGCCs), insbesondere von L-Typ (Cacna1f) verändert. Dies moduliert die Öffnungswahrscheinlichkeit von Cacna1f und löst damit ein charakteristisches Muster rhythmischer, anhaltender intrazellulärer Kalziumoszillationen aus. Ausschließlich diese Kalziumoszillationen sind in der Lage, die biologische Antwort zu erzeugen, im Gegensatz zu pharmakologisch oder physikalisch induziertem Kalziumeinstrom. Die biologische Antwort besteht in einer Aktivierung des Transkriptionsfaktors Sp7, der an das EMF-induzierbare Element des *Lgr4*-Gens bindet und somit die Expression von *Lgr4* initiiert. Die Bildung des Proteins *Lgr4* steht somit unter der Kontrolle des ELF-EMF.

Ergebnisse – Anwendung in der Gentherapie:

Um die in-vivo Anwendbarkeit des IE-Gen-Switches zu überprüfen stellten die Wissenschaftler in transgenen Mausmodellen verschiedene Proteine unter die Kontrolle des EMF-induzierbaren Elements. Darunter OSK-Faktoren (Reprogrammierungsfaktoren in der regenerativen Medizin), pathogenes Amyloid-Vorläuferprotein (Induktion von Alzheimer-ähnlicher Erkrankung) und Tph2 (Serotoninsynthese, Therapie von depressions-ähnlicher Erkrankung). Die Autoren waren in der Lage, gezielt zeitlich und auf einzelne anatomische Regionen begrenzt, die Transgene durch das EMF zu induzieren. Die OSK-Therapie konnte Alterungs-Mausmodelle teil-wiederherstellen. Ebenso effektiv löste lokal angewendetes EMF pathologische A β 42-Akkumulation, Plaquebildung und Neuroinflammation im Alzheimer-Modell aus. Im Depressionsmodell stellte die EMF-Exposition die serotonerge Aktivität wieder her und normalisierte depressionsassoziierte Verhaltensparameter.

Anmerkungen der Redaktion:

Die vorliegende Publikation zeichnet sich durch eine exzellente Methodik aus. Umfassende Screening-Methoden, wiederholte Validierung (Knock-out und Rettung), Echtzeit-Zell-Bildgebung, transgene Tiermodelle und Langzeitdaten bilden eine belastbare Evidenzkette. Obwohl die Autoren bei wildtypischen Mäusen keine Hinweise auf eine gesundheitsschädliche Wirkung der Befeldung fanden, ist die Studie aus Sicht des Strahlenschutzes von besonderer Relevanz. Sie liefert erstmals einen plausiblen, molekular verifizierten Mechanismus, über den EMF spezifische Genexpressionsveränderungen auslösen können. Die Mediatoren dieses Mechanismus sind spannungsgesteuerte Kalziumkanäle, wie bereits 2013 von Pall postuliert (1).

Die Autoren interpretieren die beobachteten Kalziumoszillationen als biologischen Frequenzcode. Die Zelle übersetzt die spezifische Kalzium-Dynamik in ein definiertes Transkriptionsprogramm auf bio-orthogonale Weise. Die Frage, ob ähnliche Signalketten auch durch umgebungs- und alltagsrelevante EMF-Quellen aktiviert werden können, stellt sich damit drängender denn je. Dass niederfrequente EMF, wie z. B. durch Wechselstrom (50 Hz), die Genexpression verändern können, ist nun belegt. Welche Implikationen dies für andere alltagsrelevante EMF wie z. B. Drahtloskommunikation besitzt, ist noch nicht absehbar (2). Sie vermuten, dass die niederfrequente Pulsmodulation der hochfrequenten Trägerwelle maßgeblich an der Bioaktivität realer Mobilfunksignale beteiligt ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle, die aktuellen Grenzwerten zugrunde liegen, zu trivial sind, um verlässliche Vorhersagen zu treffen. Schon lange weisen wissenschaftliche Publikationen darauf hin, dass die biologische Wirksamkeit von EMF nicht ausschließlich durch thermische Effekte erklärt werden kann. Nun ist ein Schlüsselmechanismus identifiziert, der das thermische Dogma als obsolet entlarvt. Die Autoren weisen jedoch auch darauf hin, dass weitere Studien nötig sind, um den exakten molekularen Mechanismus aufzuklären, wie die EMF-induzierten Veränderungen in Cyb5b den Öffnungszustand von Cacna1f mechanistisch modulieren. Die Datenlage ist jedoch bereits jetzt robust genug, um Verantwortliche in eine Aktion zu zwingen und bestehende Grenzwerte inkl. zugrundeliegender Modelle zu überdenken. (RH)

- 1 Pall ML. Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*. 17(8),958-965. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jcmm.12088>
- 2 Panagopoulos DJ, Yakymenko I, De Iuliis GN, Chrousos GP. A comprehensive mechanism of biological and health effects of anthropogenic extremely low frequency and wireless communication electromagnetic fields. *Frontiers in Public Health*, 13, 1585441. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2025.1585441/full>



EMF stört Angstzentrum

Beteiligung des primär auditorischen Kortex-basolateralen Amygdala-Schaltkreises am veränderten Furchtgedächtnis nach elektromagnetischer Befeldung bei Mäusen

Cui Z, Shi L, Yang M, Chang C, Jin S, Hao Y et al. (2026). Involvement of the Primary Auditory Cortex-Basolateral Amygdala Circuit in Altered Conditioned Fear Memory Retrieval Following Electromagnetic Field Exposure in Mice. *Journal of Integrative Neuroscience*, 25(4), 48640. <https://doi.org/10.31083/JIN48640>

Zahlreiche Studien zeigen, dass elektromagnetische Felder (EMF) kognitive Funktionen und emotionales Verhalten beeinträchtigen können. Besonders relevant ist in diesem Kontext das konditionierte Furchtgedächtnis, da dessen Dysregulation als zentrales Merkmal posttraumatischer Belastungsstörungen gilt. Die Wirkung von EMF auf die zugrundeliegenden neuronalen Schaltkreise ist bislang weitgehend unerforscht. Der primäre auditorische Kortex (Au1) und die basolaterale Amygdala (BLA) bilden einen Schlüsselschaltkreis für die Verarbeitung und den Abruf des Furchtgedächtnisses. Die vorliegende Studie untersucht, wie eine kombinierte Befeldung mit statischem Magnetfeld und Hochfrequenz diesen Au1-BLA-Schaltkreis auf Verhaltens-, Struktur- und Signalübertragungsebene beeinflusst.

Studiendesign und Durchführung:

Zehnwöchige C57BL/6N-Mäuse wurden randomisiert in 4 Gruppen unterteilt: 1) scheinbefeldete Kontrolle; 2) Magnetfeldexposition (MF; 100 mT, 1 h/Tag); 3) HF-Exposition (HF; 9,375 GHz Trägerfrequenz unmoduliert, SAR-Wert 2,58 W/kg, 15 min/Tag) und 4) kombinierte Exposition (MF & HF). Thermische Wirkungen wurden durch rektale Temperaturmessungen ausgeschlossen. Die Tiere wurden einer auditorischen Furchtkonditionierung unterzogen. Die Aktivierung des Furchtgedächtnisses wurde durch Erstarrungsverhalten bewertet. Außerdem wurden die Hörfunktion sowie strukturell-morphologische Gewebeveränderungen in Au1 und BLA analysiert. Des Weiteren wurden Projektionsneuronen (Verbindung Au1-BLA) sowie die Kalziumdynamik der Au1- und BLA-Neuronen untersucht. Zur funktionellen Charakterisierung wurden exzitatorische (CaMKII-exprimierende) Au1-Neuronen gezielt aktiviert oder inhibiert und die nachgeschalteten exzitatorischen und inhibitorischen Neuronen in der BLA überprüft. Je nach Analyse wurden 6 oder 8 Proben pro untersuchter Gruppe verwendet (n = 6|8).

Ergebnisse:

Ausschließlich die kombiniert befeldete Gruppe (MF & HF) zeigte nach 7-tägiger Befeldung eine signifikante Veränderung

des Erstarrungsverhaltens, ein klares Zeichen für die Beeinträchtigung des Furchtgedächtnisses. Die Hörfunktionen waren nicht verändert. Strukturell zeigten sich in den befeldeten Gruppen pathologische Veränderungen gegenüber der Kontrollgruppe, darunter Mitochondrienschwellung, Chromatin-Kondensation und Degranulation des endoplasmatischen Retikulums. Diese Veränderungen waren ausgeprägter in der kombiniert befeldeten Gruppe als in der MF- oder HF-Gruppe und ausgeprägter in den Au1-Neuronen als in den BLA-Neuronen. Damit konsistent waren die Nissl-Körperchen bei den kombiniert befeldeten Au1-Neuronen signifikant reduziert. Auch die Verbindung zwischen Au1- und BLA-Areal (neuronaler Projektion) wies eine geschwächte Signalübertragung auf. Korrespondierend war in der kombiniert befeldeten Gruppe die Kalziumaktivität während der Furchtreaktion statistisch signifikant vermindert. Funktionell zeigte sich, dass die chemische Aktivierung der exzitatorischen Au1-Neuronen das Furchtverhalten und die BLA-Kalziumdynamik partiell wiederherstellte, während die chemische Inaktivierung den Phänotyp verstärkte. In der BLA zeigte sich nach kombinierter Befeldung eine erhöhte Aktivierung exzitatorischer, nicht jedoch inhibitorischer Neurone, die durch die Au1-Aktivierung abgeschwächt wurde.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse zeigen, dass eine kombinierte Befeldung aus statischem Magnetfeld und HF-EMF den Au1-BLA-Schaltkreis funktionell schwächen und dadurch den Abruf des Furchtgedächtnisses beeinträchtigen kann. Die funktionelle Überprüfung weist darauf hin, dass eine reduzierte glutamaterge Ausgangsaktivität des Au1 mit nachgeschalteter Dysregulation cholinergischer BLA-Neuronen beteiligt ist. Die beobachteten Beeinträchtigungen sind nicht auf eine Störung der peripheren Hörfunktion oder initialen sensorischen Reizverarbeitung zurückzuführen.

Anmerkungen der Redaktion:

Die vorliegende Studie zeichnet sich durch ihren multimodalen Ansatz aus: Verhaltenstest, Chemogenetik, Kalziumbildung, Elektronenmikroskopie und virales Tracing (Projektionsneurone) werden zu einer konsistenten Evidenzkette verknüpft. Eine mögliche klinische Relevanz ergibt sich aus dem Bezug zur posttraumatischen Belastungsstörung, wobei diese Tierversuchsdaten nicht direkt auf den Menschen übertragbar sind. Die Stärke des statischen Magnetfeldes liegt unterhalb der Unbedenklichkeits-Einstufung der ICNIRP (400 mT), während die spezifische Absorptionsrate des HF-EMF mit 2,58 W/kg in der Größenordnung der zulässigen Belastung für den Kopf liegt (2 W/kg). Bemerkenswert ist, dass die EMF-Wirkungen vor allem synergistisch auftreten, wie es z. B. auch bei realer Drahtloskommunikation der Fall ist. Die Niederfrequenz-Komponente bei drahtloser Kommunikation unterscheidet sich jedoch stark von dem hier verwendeten statischen Magnetfeld, da diese pulsiert ist und wesentlich schwächer. (RH)



EMF, Mikrotubuli und Krebstherapie

Niedrigenergetische, amplitudenmodulierte hochfrequente elektromagnetische Felder als systemische Therapie bei Krebs: Überblick und vorgeschlagene Wirkmechanismen

Tuszynski JA, Costa F (2022). Low-energy amplitude-modulated radio-frequency electromagnetic fields as a systemic treatment for cancer: review and proposed mechanisms of action. *Frontiers in Medical Technology*, 4, 869155. <https://doi.org/10.3389/fmedt.2022.869155>

Bis heute ist Leberkrebs die vierthäufigste krebsbedingte Todesursache und gemessen an der 5-Jahres-Überlebensrate die zweithäufigste tödliche Krebsart. Die hier vorgestellte Übersicht konzentriert sich auf medizinische Geräte, die elektromagnetische Felder (EMF) mit geringer Leistung und einer Trägerfrequenz von 27,12 MHz abgeben, die im Bereich von 10 Hz bis 150 kHz amplitudenmoduliert sind. Die Studie fasst die Evidenz zur Wirksamkeit und Sicherheit der Exposition gegenüber elektromagnetischen Radiofrequenzfeldern mit niedriger Energie und Amplitudenmodulation („low-energy amplitude-modulated radiofrequency“, LEAM RF EMF) bei Patienten mit Leberkrebs zusammen. Die abgegebene Leistung ist viel zu gering, um eine nachweisbare Erwärmung des Gewebes zu verursachen. Vielmehr beruhen die Auswirkungen der Exposition gegenüber LEAM-RF-EMF auf den resonanten Wechselwirkungen elektromagnetischer Wellen mit subzellulären Strukturen normaler Zellen und Krebszellen im menschlichen Körper. In den Zellen sind geladene Moleküle über Membranen hinweg verteilt, wodurch elektrische und chemische Potentialunterschiede entstehen, ähnlich wie in einer Batterie. Diese Potentialunterschiede liefern die ionenbewegenden Kräfte, die fast allen physiologischen Prozessen in Zellen zugrunde liegen. Zellen enthalten zudem hochgeladene makromolekulare Strukturen, darunter Mikrotubuli (MTs), die neben ihrer bekannten Rolle bei der Zellteilung auch an der Ausbreitung elektrischer Signale in der Zelle beteiligt sind.

Studiendesign und Durchführung:

Die Studie berichtet über zwei medizinische LEAM-RF-EMF-Geräte mit 27,12 MHz: das P1 (TheraBionic GmbH, Ettlingen, Deutschland) und das AutEMdev (Autem Therapeutics, Hanover, NH, USA). Die Leistung der Geräte (100 mW) ist etwa 1.000-mal geringer als die eines Mobiltelefons und 100.000-mal geringer als die von Geräten zur thermischen Tumorablation; die spezifische Absorptionsrate (SAR) liegt bei 1,77 mW/kg. Darüber hinaus unterscheiden sich die Frequenzbereiche von denen, die in der Telekommunikation verwendet werden. Beide Geräte nutzen eine sinusförmige Amplitudenmodulation der Trägerwel-

le, wobei die Frequenzen beim AutEMdev zwischen 10 Hz und 20 kHz und beim P1 zwischen 0,1 Hz und 150 kHz liegen. Sowohl die feste 27,12-MHz-Trägerwelle als auch die Amplitudenmodulationen könnten an den physiologischen und therapeutischen Wirkungen beteiligt sein. Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass elektromagnetische Wellen bei diesen Frequenzen mit Schwingungen geladener makromolekularer Strukturen und Ionenströmen innerhalb der Zellen in Resonanz treten, ähnlich wie eine Glocke in Resonanz schwingt, wenn sie Schallwellen der richtigen Frequenz ausgesetzt ist. Das bedeutet, dass, obwohl die Antenne des Geräts im Mund des Patienten platziert ist, der gesamte menschliche Körper ebenfalls zu einer Antenne wird. Mit Ausnahme der Knochen verteilen sich die Auswirkungen der Exposition daher über den gesamten Körper.

Ergebnisse:

Eine schlaffördernde Wirkung bei Patienten mit Schlaflosigkeit war der erste berichtete potenzielle klinische Nutzen von LEAM-RF-EMF. Eine Wirkung von hochfrequenten EMF auf die α -Wellen des menschlichen Gehirns, die eine Frequenz von 8-13 Hz aufweisen, könnte diesen Beobachtungen zugrunde liegen. In zwei In-vitro-Studien war die Wachstumshemmung von Leberkrebszelllinien bei zuvor identifizierten leberkrebspezifischen Frequenzen größer als bei brustkrebspezifischen Frequenzen oder zufällig ausgewählten Frequenzen. Es gab Hinweise darauf, dass der Ca^{2+} -Einstrom über den spannungsgesteuerten CACNA1H-Calciumkanal an den krebshemmenden Wirkungen beteiligt war. Bislang wurden fünf Berichte veröffentlicht, in denen die Geräte AutEMdev oder P1 bei Patienten mit Leberkrebs eingesetzt wurden. In einem gepoolten Vergleich war die mediane Gesamtüberlebenszeit („Overall survival“, OS) für Patienten, die das TheraBionic P1-Gerät als Erstlinientherapie erhielten, mit 6,7 Monaten etwas höher als die mediane OS von 4,6 Monaten bei historischen Kontrollpatienten, die Sorafenib als Chemotherapie erhielten. Diese Ergebnisse führten zur Einleitung einer größeren, multizentrischen klinischen Studie, die zu ähnlichen Ergebnissen führte. Die Studien mit den Geräten AutEMdev und P1 lieferten Belege für die Antitumorwirksamkeit und/oder die Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität bei Patienten, die die Behandlung fortsetzten, und das Gesamtüberleben in der prospektiven Studienkohorte war länger im Vergleich zur Kontrolle. Abgesehen von leichter Müdigkeit und vereinzelte Reizung der Mundschleimhaut (bei Kombination mit typischer Chemotherapie) ist die Behandlung frei von Nebenwirkungen.

Schlussfolgerungen:

Die Karzinogenese kann als ein Phasenübergang betrachtet werden, bei dem normalerweise synchronisierte, homogene und differenzierte Zellen in geordneten Geweben zu asynchronen, heterogenen, entdifferenzierten und proliferativen Krebszellen in ungeordneten Tumoren werden. Auch die Ruhe-

membranpotenziale sind verändert (deutlich gesenkt), und der Stoffwechsel verlagert sich von der oxidativen Phosphorylierung zur Glykolyse. Nahezu alle Zellen verfügen über ein Ruhemembranpotential, und spannungsgesteuerte Ionenkanäle kommen auch in nicht-erregbaren Zellen vor. (Diese Ionenkanäle sind in der Zellmembran und Mitochondrienmembran lokalisiert, die Mikrotubuli bilden eine „Verkabelung“, die sich innerhalb der Zelle erstreckt und an die Membranen bzw. Ionenkanäle andockt, Anm. der Redaktion.) Mikrotubuli können elektrische Ströme über die sie umgebenden Gegenionen leiten, und sind leitfähiger als das Zytoplasma, daher fungieren sie als Hauptleiter für die Ausbreitung zellulärer Ionenwellen. Die resonante Kopplung von EMF mit Mikrotubuli (wobei Mikrotubuli als zelluläre Bioantennen wirken) könnte daher die Hauptgrundlage für die medizinischen Anwendungen von EMF bilden. Die Auswirkungen auf die Ionenströme in den Mikrotubuli könnte die Zellteilung beeinträchtigen und den subzellulären Transport der Mitochondrien stören. Mikrotubuli sind in Längsrichtung extrem leitfähig für Wechselströme bei Frequenzen nahe der 27,12-MHz-Trägerwelle der medizinischen LEAM-RF-EMF-Geräte. Die Trägerwelle hat wahrscheinlich eine verstärkende Wirkung auf die Ionenströme entlang der Mikrotubuli, wodurch die Zellen anfällig für die Auswirkungen der Amplitudenmodulation mit niedrigerer Frequenz werden. LEAM-RF-EMF kann den Zellstoffwechsel in Krebszellen weg von der Glykolyse verlagern und somit zur Wiederherstellung des normalen Phänotyps führen. Die Autoren berechneten die pro Zelle aufgrund der durch EMF (in den Mikrotubuli) induzierten Ionenströme abgegebene Energie und verglichen diese mit der gesamten metabolischen Energieproduktion pro Zelle. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Energiezufuhr durch die Behandlung maßgeblich dazu beitragen könnte, die zelluläre Energiebilanz von der Glykolyse hin zur Fettsäureoxidation zu verschieben. Die Schätzungen von etwa 50 fW für die pro Zelle abgegebene EMF-Leistung entsprechen etwa 1,5 % der metabolischen Leistung in normalen Zellen. In Leberkrebszellen kann die mitochondriale oxidative Phosphorylierung um bis zu 50 % reduziert sein. Die menschliche Leber verbraucht normalerweise etwa 15 W Leistung (oder 15 % der Stoffwechselleistung des gesamten Körpers). Die Glykolyse ist neunmal weniger effizient als die oxidative Phosphorylierung; um also die gleiche Energieausbeute aufrechtzuerhalten, müssen die Zellen ihren Glukoseverbrauch um denselben Faktor steigern. Folglich können 50 fW pro Zelle bis zu 13,5 % des Glukoseverbrauchs in Zellen ausmachen, die Glykolyse nutzen, verglichen mit 1,5 % in solchen, die oxidative Phosphorylierung nutzen. Die Autoren haben gezeigt, dass die Frequenz des Ladungstransfers über isolierte Mikrotubuli *in vitro* (ca. 30 Hz) in den Frequenzbereich der Amplitudenmodulation therapeutischer LEAM-RF-EMF-Geräte fällt. Insbesondere können sich durch Resonanzkopplung oszillierende Ionenströme in den kondensierten Ionen bilden, die die Mikrotubuli umgeben und sich in ihren Innenräumen befinden. Diese Ionenströme können dann zu Störungen der Ionenkanäle, der

Zellteilung, der Motorproteine, des mitochondrialen Transports und der Morphologie sowie des zellulären Energiehaushalts führen. Diese mutmaßlichen Wirkmechanismen überschneiden sich potenziell und schließen sich nicht gegenseitig aus; sie alle erfordern weitere Untersuchungen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Exposition mit LEAM-RF-EMF ein potenzieller Weg ist, um das Verhalten von Krebszellen bei Patienten mit fortgeschrittener Erkrankung zu verändern.

Anmerkungen der Redaktion:

Obschon viele Details noch unklar sind, ist hier ein vielversprechender Ansatz. Da diese elektromagnetische Methode, Krebs zu bekämpfen oder verlangsamen auch praktisch frei von Nebenwirkungen ist, wäre weitere Erforschung dieser biomedizinischen Anwendung von EMF sehr wünschenswert. (AT)



EMF, Mikrotubuli und Gehirn

Unterschiede in der elektrischen Aktivität der Mikrotubuli im Hippocampus und im Neokortex erwachsener Ratten

Cantiello HF, Porcari CY, Albarracín VH, Murphy D, Mecawi AS, Godino A et al. (2025). Differences in brain microtubule electrical activity of the hippocampus and neocortex from the adult rat. *bioRxiv*, 688943. <https://doi.org/10.1101/2025.11.18.688943>

Es wird angenommen, dass Gehirnwellen synchronisierte elektrische Schwingungen widerspiegeln, die durch die Aktivität großer Gruppen aktiver Neuronen erzeugt werden und mittels Elektroenzephalogramm (EEG) sowie Aufzeichnungen des lokalen Feldpotenzials (LFP) beobachtet werden können. Gehirnwellen kommen in verschiedenen Tierstämmen vor (z. B. Insekten und Wirbeltiere), was auf eine grundlegende Rolle bei den Rechenprozessen des Gehirns hindeutet. Verschiedene Arten von Gehirnwellen, die sich durch Frequenz und Amplitude auszeichnen, wie Alpha-, Beta-, Delta-, Theta- und Gammawellen, weisen unterschiedliche Muster oszillatorischer Aktivität auf. Aktuelle Studien unterstreichen die Bedeutung der Wellenkohärenz für verschiedene kognitive Funktionen, insbesondere für Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Eine erhöhte Kohärenz zwischen bestimmten Hirnregionen steht im Zusammenhang mit einer verbesserten Aufmerksamkeitsleistung, während eine verminderte Kohärenz mit Aufmerksamkeitsdefiziten assoziiert ist. Die Aufrechterhaltung des Kurzzeitgedächtnisses beinhaltet eine koordinierte Aktivität zwischen dem präfrontalen Kortex und dem Hippocampus. Frühere Studien haben gezeigt, dass Polymere des Zytoskeletts, darunter Aktinfilamente und Mikro-

tubuli (MTs), intrinsische elektrische Eigenschaften aufweisen, die zu intrazellulären Schaltkreisen in Neuronen beitragen und möglicherweise elektrische Schnittstellen zu Ionenkanälen bilden, die an der neuronalen Aktivität beteiligt sind. Insbesondere erzeugen MTs im Gehirn spontane elektrische Schwingungen mit Frequenzen, die denen von Gehirnwellen ähneln, was auf eine zentrale Rolle für die Gehirnfunktion hindeutet. In dieser Studie untersuchten die Autoren mithilfe von LFP-Messungen in Verbindung mit einem Patch-Clamp-System das Vorhandensein endogener Schwingungen in identifizierten Regionen des Gehirns erwachsener Ratten und konnten spezifische Muster mit deutlichen Frequenzspitzen nachweisen.

Studiendesign und Durchführung:

Rattenhirngewebeproben (n = 43), die bis zum Zeitpunkt des Experiments in extrazellulärer Lösung aufbewahrt wurden, wurden mit einem Patch-Clamp-Verstärker und einer Pipettenelektrode untersucht, die mit einer intrazellulären Salzlösung gefüllt war (identische KCl-Konzentration in Pipette und Bad). Um den Einfluss der Ionenkonzentration auf die elektrischen Ströme zu bewerten, wurde Rattenhirngewebe 24-48 Stunden lang in einer KCl-Lösung inkubiert. Wie zuvor wurde das Hirngewebe unter symmetrischen KCl-Bedingungen mit einem Patch-Clamp-Verstärker untersucht. Um den Beitrag der Mikrotubuli (MTs) zu den elektrischen Oszillationen im Rattenhirn zu bewerten, untersuchten die Autoren die Wirkung des MT-Stabilisators Paclitaxel, der die elektrischen Oszillationen von MT-Präparaten eliminiert.

Ergebnisse:

Spannungsgeklemmte Kortexprouben zeigten spontane, sich selbst erhaltende elektrische Schwingungen, die direkt auf die Stärke und Polarität des elektrischen Reizes reagierten. Ähnliche Ergebnisse wurden bei den Hippocampusproben erzielt. Die Fourier-Spektren zeigten für beide Proben (Kortex und Hippocampus) eine Grundfrequenz von ~38 Hz. Die Frequenz ist bereits bei 0 mV vorhanden, was auf das Vorhandensein eines chemischen Gradienten zwischen dem umgebenden Milieu der Hirnsubstanz und dem Inneren der Pipette hindeutet. Die Schwingung war bei den Kortexprouben ausgeprägter als beim Hippocampus. Spannungsgeklemmte Kortexprouben, die in KCl inkubiert wurden, zeigten spontane, selbsttragende elektrische Schwingungen, die direkt auf die Stärke und Polarität des elektrischen Reizes reagierten. Ähnliche Ergebnisse wurden bei den Hippocampusproben erzielt. Die Fourier-Spektren zeigten für beide Proben (Kortex und Hippocampus) eine Grundfrequenz von ~38 Hz. Die Schwingungsfrequenz ist auch hier bei 0 mV vorhanden. Nach der Inkubation mit KCl waren die Schwingungen bei den Proben aus dem Kortex und dem Hippocampus ähnlich. Die spontanen elektrischen Schwingungen waren nach Zugabe von Paclitaxel deutlich reduziert (aber noch messbar), wobei im Fall des Hippocampus eine fast vollständige Hemmung erreicht wurde. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass MTs eine grund-

gende Rolle bei den im Rattengehirn beobachteten intrazellulären Schwingungen spielen. Laut elektronenmikroskopischen Aufnahmen scheinen die longitudinalen MTs im Kortex weniger organisiert zu sein als im Hippocampus. Die elektrischen Unterschiede könnten mit dem Grad der Ordnung der MT-Anordnungen übereinstimmen, wie es verwandte Studien nahelegen.

Schlussfolgerungen:

Diese Studie trägt wesentlich zum Verständnis der Rolle von Mikrotubuli bei neuronalen elektrischen Oszillationen bei. Der MT-Stabilisator Paclitaxel ist ein Antimitotikum, von dem bekannt ist, dass es mit Bindungsstellen im Inneren von MTs interagiert. Die deutliche Unterdrückung der elektrischen Oszillationen durch Paclitaxel im Kortex und im Hippocampus unterstreicht die entscheidende Rolle von MTs bei diesen Oszillationen. Andere aktuelle Studien der Forschungsgruppe der Autoren zeigten, dass isolierte Mikrotubuli-Bündel aus Rinderhirn ebenfalls spontane, sich selbst erhaltende elektrische Oszillationen erzeugen, die Frequenzkomponenten im Bereich der Gehirnwellen aufweisen [1]. MT-gesteuerte elektrische Oszillationen mit markanten Spitzen um 38 Hz und 90 Hz wurden zuvor auch im Gehirn von Honigbienen beobachtet, was die interessante Möglichkeit nahelegt, dass MTs im Gehirn einen zentralen Oszillator darstellen [2]. Diese Daten deuten darauf hin, dass das Zytoskelett intrazelluläre elektrische Signale vermittelt, was ein zentrales Phänomen des Hirngewebes sein könnte.

Anmerkungen der Redaktion:

Aufgrund ihrer hohlzylindrischen Struktur und ihres Kristallgitters wird vermutet, dass Mikrotubuli als biologische Wellenleiter fungieren, also als Strukturen, die elektromagnetische Wellen innerhalb von Zellen leiten. Durch ihre Geometrie, ihren dielektrischen Kontrast und ihre Symmetrie ähneln sie künstlichen optischen Wellenleitern, ähnlich Glasfaserkabeln. Mikrotubuli sind die ersten Makromoleküle, deren elektromagnetisches Verhalten vollständig modelliert werden kann. Da sie nachweislich mit spannungsgesteuerten Ionenkanälen in der Zellmembran verbunden sind, sind sie wahrscheinlich direkt oder indirekt an den biologischen Wirkungen (externer) elektromagnetischer Felder beteiligt. (AT)

- 1 Gutierrez BC, Pita Almenar MR, Martínez LJ, Siñeriz Louis M, Albarracín VH, Cantero MD, Cantiello HF (2021). Honeybee brain oscillations are generated by microtubules. The concept of a brain central oscillator. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 14, 727025. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2021.727025>
- 2 Scarinci N, Priel A, Cantero MD, Cantiello HF (2023). Brain microtubule electrical oscillations – Empirical Mode Decomposition analysis. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 43(5), 2089-2104. <https://doi.org/10.1007/s10571-022-01290-9>



Aktuelle Grenzwerte zu hoch

Die Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder berücksichtigen weder Krebsrisiko noch Fortpflanzungstoxizität, die von Daten aus Tierversuchen hervorgehen

Melnick RL, Moskowitz JM (2026). Exposure limits to radiofrequency EMF do not account for cancer risk or reproductive toxicity assessed from data in experimental animals. *Environmental Health*, 25(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s12940-026-01288-6>

Die aktuellen Grenzwerte von FCC (Federal Communications Commission, USA) und ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, EU) basieren auf Verhaltensstudien von Ratten (n = 8) und Affen (n = 6) aus den 1980er Jahren. Das einzige Bewertungskriterium dieser Studien war, bei welchen Frequenzen und Leistungsdichten nach 40 oder 60 Minuten Befeldung die Reaktionsraten zum Drücken eines Hebels zur Freigabe von Futterpellets im Vergleich zu den Kontrollen signifikant vermindert waren. Es wurden keine weiteren Endpunkte oder Befeldungsdauern bewertet. Beruhend auf der Erhöhung der Körperkerntemperatur von ca. 1,0 °C wurde eine spezifische Absorptionsrate von 4 W/kg als Grenzwert für die gesundheitsschädliche Wirkung von Hochfrequenz festgelegt, die bis heute gilt. Sie wurde lediglich durch willkürliche Sicherheitsfaktoren auf 0,08 W/kg für die Allgemeinbevölkerung gesenkt. Chronische Befeldung oder nicht-thermische Wirkungen werden nicht berücksichtigt. Zwei aktuelle, systematische WHO-Reviews (1,2) kommen jedoch mit „hoher Gewissheit der Evidenz“ zu dem Schluss, dass HF-Befeldung mit einem erhöhten Krebsrisiko und einer verminderten männlichen Fruchtbarkeit assoziiert ist. Die Autoren, u. a. ein ehemaliger leitender Wissenschaftler des US National Toxicology Program (NTP), nutzen Daten aus vorhandenen Tiermodellen, um veritablere Grenzwerte zu berechnen.

Studiendesign und Durchführung:

Bezüglich der Tumordaten führten die Wissenschaftler Benchmark-Dosis-Analysen (BMD) mit den Tumorraten aus den Rattenmodellen der NTP- und Ramazzini-Institut-Studien durch. Da der Wirkmechanismus der Tumorinduktion unbekannt ist, verwendeten sie eine lineare Niedrigdosis-Extrapolation der BMD01- (1%ige Risikoerhöhung) und BMDL01-Werte (unteres 95-Konfidenzintervall für eine 1%ige Risikoerhöhung), nach den EPA-Leitlinien zur Krebsrisikoabschätzung. Diese lineare Extrapolation liefert Schätzwerte für Ganzkörper-SAR-Werte, die mit einem zusätzlichen Krebsrisiko von 1:100.000 verbunden sind. Für die schädliche Wirkung auf die männliche Fruchtbarkeit nutzten die Autoren die von (2) berichtete lineare Potenz

von 3 % verminderter Trächtigkeitsrate pro W/kg und wendeten standardisierte Unsicherheitsfaktoren (10 x Übertragbarkeit Tier-Mensch, 10 x individuelle Schwankung, 3 x weil eine „Kein-Effekt-Dosis“ nicht vorliegt).

Ergebnisse:

Der abgeleitete SAR-Wert, der einer Krebsrisikoerhöhung von 1:100.000 entspricht, liegt je nach zugrundeliegender Studie zwischen 0,7 und 5,3 mW/kg für eine Stunde Hochfrequenzbefeldung am Tag. Der aktuelle ICNIRP/FCC-Ganzkörpergrenzwert für die Allgemeinbevölkerung liegt bei 80 mW/kg. Bei einer täglichen Exposition von einer Stunde überschreitet der geltende Grenzwert das tolerierbare Krebsrisiko um das 15- bis 114-Fache, bei acht Stunden täglich um das 121- bis 909-Fache. Für die männliche Fruchtbarkeit führt die Anwendung der standardisierten Unsicherheitsfaktoren zu Grenzwerten von 3,3-10 mW/kg. Der aktuelle Grenzwert liegt damit 8- bis 24-fach zu hoch.

Schlussfolgerungen:

Die bestehenden Mobilfunk-Grenzwerte von FCC und ICNIRP sind nicht in der Lage, die körperliche Unversehrtheit der Allgemeinbevölkerung zu gewährleisten. Für beruflich exponierte Gruppen (400 mW/kg) verschlechtert sich die Prognose um den Faktor 5. Die Autoren fordern eine unabhängige Neubewertung der Grenzwerte unter Einbeziehung der wissenschaftlichen Ergebnisse der vergangenen 30 Jahre und unter Anwendung standardisierter Methoden der Risikoabschätzung. Des Weiteren merken sie an, dass sie möglicherweise das reale Risiko unterschätzen, da der SAR-Wert als solcher keine angemessene Metrik ist (biologische Wechselwirkungen auf molekularer Ebene durch Nahfeld-Endgeräte werden außer Acht gelassen).

Anmerkungen der Redaktion:

Die Autoren wenden exakt jene Instrumente an, die Gesundheitsbehörden weltweit zur Risikobewertung chemischer Kanzerogene nutzen. Wäre Mobilfunk eine Chemikalie, wäre sie nach denselben Maßstäben als inakzeptables Gesundheitsrisiko eingestuft. Dass selbst eine einstündige tägliche Nutzung von Mobiltelefonen innerhalb regulatorischer Grenzwerte das Krebsrisiko um ein Vielfaches des Akzeptablen übersteigt, ist besorgniserregend. Die Publikation liefert eine belastbare Grundlage, die den Reformationsstau des angestaubten thermischen Dogmas unübersehbar macht. (RH)

1. Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW et al. (2024). Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Environmental International*, 199, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109482>
2. Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C et al. (2024). Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Environmental International*, 185, 108509. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108509>



Schlafstörungen auf dem Vormarsch

Zunehmende Schlafprobleme in der schwedischen Bevölkerung

Nilsson M, Hardell L (2026). Increasing numbers of persons with sleeping problems in Sweden. *Diseases*, 14(1):25. <https://doi.org/10.3390/diseases14010025>

Seit Beginn des Jahrtausends ist die Exposition der Bevölkerung gegenüber hochfrequenter Mobilfunkstrahlung durch die flächendeckende Verbreitung von Smartphones sowie den sukzessiven Ausbau der Mobilinfrastruktur (3G, 4G, 5G) erheblich gestiegen. Parallel dazu nehmen Schlafstörungen in Schweden zu, insbesondere bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen. Dabei handelt es sich um Altersgruppen, die historisch kaum von Schlafstörungen betroffen waren. Die vorliegende Studie untersucht, ob die Häufigkeit klinisch diagnostizierter Schlafstörungen zwischen 2001 und 2024 zugenommen hat, und ob ein zeitlicher Zusammenhang (Korrelation) mit der gestiegenen HF-Belastung bzw. zunehmender Bildschirmzeit besteht.

Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren werteten das nationale Patientenregister Schwedens im Zeitraum von 2001 bis 2024 aus. Erfasst wurden ambulante Patienten, bei denen die ICD-10-Diagnosen G47 (Schlafstörungen mit organischer Ursache) oder F51 (nicht-organische Schlafstörungen) als Hauptdiagnose festgestellt wurden. Die Auswertung erfolgte in fünf Alterskohorten (0-4, 5-19, 20-39, 40-59 und 60+ Jahre), normiert auf je 100.000 Einwohner.

Ergebnisse:

Für die Diagnose G47 wurden in allen Alterskohorten deutliche Anstiege dokumentiert. Der stärkste Zuwachs zeigte sich in der Altersgruppe der 5- bis 19-Jährigen. Hier stieg die Anzahl der diagnostizierten Patienten um das 17-Fache von 13,8 pro 100.000 im Jahr 2001 auf 235,6 pro 100.000 im Jahr 2024. Der Anstieg beschleunigte sich nach 2009 erheblich, zeitlich mit der flächendeckenden Einführung von Smartphones und dem Ausbau des 4G-Netzes korrelierend. Auch bei allen anderen Alterskohorten stieg die Rate der Schlafstörungen an: bei Kleinkindern (0-4 Jahre) von 41,5 auf 215,8; bei jungen Erwachsenen (20-39 Jahre) von 40,4 auf 220,9; bei älteren Erwachsenen (40-59 Jahre) von 169,5 auf 362,8 und bei Senioren (60+ Jahre) von 116,4 auf 322,9. Für die Diagnose F51 wurden keine wesentlichen Veränderungen beobachtet.

Schlussfolgerungen:

Die Autoren konstatieren eine bevölkerungsweite Zunahme klinisch diagnostizierter Schlafstörungen in Schweden, die zeitlich mit dem Ausbau der Mobilfunkinfrastruktur und steigender Endgerätenutzung zusammenfällt. Als mögliche Ursachen werden die Wirkung des Mobilfunks auf die Gehirnaktivität und die Unterdrückung der Melatoninproduktion durch Blaulicht aus Bildschirmen diskutiert. Die Wissenschaftler betonen jedoch den hypothesegenerierenden Charakter der Studie und fordern weiterführende Studien, die Schlafstörungen, Mobilfunkbelastung und biologische Parameter gezielt erfassen. Der Anstieg sei jedoch in keinem Fall auf eine höhere Meldequote zurückzuführen.

Anmerkungen der Redaktion:

Besonders besorgniserregend ist die ausgeprägte Zunahme der diagnostizierten Schlafstörungen bei Kindern und Jugendlichen. Hierbei handelt es sich um Altersgruppen, die Entwicklungsphasen durchlaufen und dadurch besonders empfindlich gegenüber Mobilfunkbelastung sind. Laut einer statistischen Untersuchung des schwedischen staatlichen Medienrates nutzen 2022 mehr als 70 % der schwedischen Kinder im Alter von 15 und 40 % der Kinder im Alter von 12 Jahren ein Mobiltelefon mehr als drei Stunden pro Tag. Als wesentliche Limitation der Studie ist der rein korrelative registerbasierte Ansatz zu nennen. Kausale Schlüsse sind methodisch nicht möglich, Confounder wie z. B. pandemiebedingte Stresssymptomatik können nicht kontrolliert werden. Dennoch liefert die Studie einen relevanten epidemiologischen Befund, der im Kontext des wachsenden Literaturfundus zu HF-induzierten neurophysiologischen Pathologien nicht ignoriert werden sollte (RH).



Hochspannung und Gesundheit

Langfristige Exposition gegenüber Magnetfeldern im Wohnbereich und Sterblichkeit aufgrund neurodegenerativer Erkrankungen: Eine 18-jährige landesweite Kohortenstudie in der Schweiz

Sandoval-Diez N, Loizeau N, Huss A, Rösli M, Vienneau D (2026). Long-term residential magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality: An 18-year nationwide cohort study in Switzerland. *Environment International*, 208, 110145. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2026.110145>

Die potenziellen Gesundheitsrisiken der Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern (ELF-MF) sind nach wie vor umstritten. Im Jahr 2001 stuft die Internationale Agentur für Krebsforschung ELF-MF als potenzielles Humankarzinogen (Gruppe 2B) ein, basierend auf „unzureichenden Belegen“ aus Tierversuchen und „begrenzten“ epidemiologischen Hinweisen, die eine Exposition über 0,3-0,4 μT mit Leukämie im Kindesalter in Verbindung bringen. Über Krebserkrankungen hinaus wurde die Exposition gegenüber ELF-MF als Risikofaktor für neurodegenerative Erkrankungen vermutet. In einer früheren Studie [1] wurde ein erhöhtes Risiko für die Mortalität durch Alzheimer-Krankheit bei Menschen mit langjähriger Wohngeschichte in der Nähe von Hochspannungsleitungen in der Schweiz beobachtet. Nachfolgende Studien in Dänemark und Italien lieferten schwache Hinweise auf eine erhöhte Alzheimer-Rate und durchweg negative Ergebnisse für andere neurodegenerative Erkrankungen. Elektrogeräte und die Innenverkabelung sind die häufigsten Quellen für die ELF-MF-Exposition in Innenräumen für die allgemeine Bevölkerung, doch solche Expositionen sind in der Regel intermittierend und von kurzer Dauer. Im Gegensatz dazu stellt die Nähe zu Außenquellen wie Hochspannungsleitungen und Eisenbahninfrastruktur einen besseren Indikator für die Langzeitexposition der allgemeinen Bevölkerung dar.

Studiendesign und Durchführung:

Die Analyse basiert auf Daten zu etwa 3,5 Millionen Erwachsenen aus der Schweizer Nationalen Kohorte (2001-2018). Anhand der SNC-Datenbank erstellten die Forscher eine geschlossene Kohorte mit einer Nachbeobachtungszeit von 18 Jahren, die ausschließlich Personen umfasste, die zum Studienbeginn (2001) 30 Jahre oder älter waren. Die langfristige ELF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen (50 Hz) und Eisenbahnstrecken (16,7 Hz) wurde anhand validierter Näherungsmodelle modelliert. Der horizontale Abstand zur nächsten Hochspannungsleitung oder Eisenbahnstrecke wurde berechnet und als Eingabe für die Modelle verwendet. Die Näherungsmo-

delle wurden anhand einer Teilmenge von Messungen validiert, die in 59 Privathaushalten durchgeführt wurden. Bei Eisenbahnstrecken wurden starke Korrelationen zwischen der vorhergesagten und der gemessenen Exposition bei ein- und mehrgleisigen Strecken beobachtet, während die gemessene ELF-MF-Exposition mit zunehmender Entfernung von Hochspannungsleitungen nur bei Ultrahochspannungsleitungen (220-380 kV) abnahm. Im Gegensatz dazu korrelierte der Abstand zu 36-150-kV-Hochspannungsleitungen nicht mit der gemessenen ELF-MF-Exposition, wahrscheinlich weil andere Quellen (z. B. Haushaltsgeräte) die gemessenen Expositionswerte dominierten. Aus diesem Grund wurden diese aus der Analyse ausgeschlossen. Die langfristige Exposition gegenüber ELF-MF wurde als zeitgewichteter Durchschnitt über Zeitfenster von 10 Jahren berechnet. Es wurden Hazard Ratios (HRs) für die Mortalität aufgrund von Alzheimer (AD), anderen Demenzformen (OTD), amyotropher Lateralsklerose (ALS), Parkinson (PD) und Multipler Sklerose (MS) geschätzt, wobei soziodemografische und umweltbedingte Co-Expositionen berücksichtigt wurden. Auch Luftverschmutzung und Lärmpegel wurden einbezogen.

Ergebnisse:

Weniger als 1 % der Bevölkerung war einer langfristigen ELF-MF-Exposition von $\geq 0,3 \mu\text{T}$ durch Hochspannungsleitungen und 2,4 % durch Eisenbahnstrecken ausgesetzt. Für ALS, PD oder MS wurden keine Zusammenhänge beobachtet. Nach Berücksichtigung soziodemografischer und umweltbedingter Co-Expositionen war ein Anstieg der Hochspannungs-Exposition um 1 μT mit einem um 54 % höheren Mortalitätsrisiko für AD verbunden (95 % KI 1,23-1,92). Bei den anderen Demenzformen waren die Zusammenhänge etwas schwächer: Ein Anstieg der Exposition um 1 μT war mit einem um 31 % höheren Mortalitätsrisiko verbunden (95 % KI 1,13-1,52). Die Zusammenhänge zwischen ELF-MF von Eisenbahnstrecken und der Mortalität bei AD und anderen Demenzerkrankungen waren weniger konsistent als die für Hochspannung beobachteten. Bei AD war die Exposition durch Eisenbahnstrecken in minimal adjustierten Modellen (HR = 1,15, 95 % KI 1,06-1,24) und in Modellen, die um soziodemografische Faktoren adjustiert waren, positiv mit der Mortalität assoziiert, schwächte sich jedoch nach Einbeziehung von Umwelt-Koexpositionen ab (HR = 1,08, 95 % KI 0,99-1,18). Ein ähnliches Muster wurde bei den anderen Demenzformen beobachtet.

Schlussfolgerungen:

Die hier vorgestellten Ergebnisse zum Mortalitätsrisiko bei Alzheimer-Erkrankungen stimmen mit der früheren Analyse der Schweizer Nationalkohorte [1] überein. Diese Ergebnisse decken sich zudem mit dem wiederholt beobachteten erhöhten Demenzrisiko bei Arbeitnehmern, die starken ELF-MF-Feldern ausgesetzt sind. Die biologischen Mechanismen, die den Zusammenhang zur Demenz erklären könnten, sind nach wie vor unklar. Es wurden mehrere Mechanismen für die Neurode-

generation vorgeschlagen, darunter Veränderungen der neuronalen Ionenkanäle, epigenetische Dysregulation und oxidativer Stress. Da eine hohe ELF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen oder Eisenbahnstrecken selten ist, würde der bevölkerungsbezogene Anteil der Alzheimer-Fälle bei einer Exposition durch Hochspannungsleitungen 1,01 % und bei einer Exposition durch Eisenbahnstrecken 0,43 % betragen, vorausgesetzt, die beobachteten Zusammenhänge wären kausal. (AT)

- 1 Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösl M (2009). Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: Longitudinal study of the Swiss population. *American Journal of Epidemiology*, 169(2), 167-175. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn297>



900 MHz und Verhalten von Honigbienen

Der Einfluss eines elektromagnetischen Feldes mit einer Frequenz von 900 MHz auf das Verhalten der Honigbiene

Migdał P, Plotnik M, Bieńkowski P, Berbec E, Latarowski K, Białocka N, Murawska A (2025). The influence of an electromagnetic field at a radiofrequency of 900 MHz on the behavior of a honey Bee. *Agriculture*, 15(12), 1266. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121266>

Es liegen nur wenige Daten darüber vor, wie elektromagnetische Strahlung (EMF) das grundlegende Verhalten von Honigbienen beeinflusst. In Laborstudien werden im Rahmen der Verhaltensanalyse in der Regel die grundlegenden Verhaltensweisen der Honigbiene untersucht. Zu diesen Verhaltensweisen zählen das Laufen (die Zeit, die die Biene in Bewegung verbringt), das Fliegen (Bewegung mit den Flügeln), der Kontakt zu Artgenossen (einschließlich gegenseitiger „Fellpflege“), die Selbstreinigung (Pflege der Körperoberfläche) und die Bewegungslosigkeit (die Zeit, in der die Biene stillsteht). Die für die Untersuchung ausgewählten Verhalten – Fliegen, Laufen, Putzen, sozialer Kontakt und Bewegungslosigkeit – spielen eine entscheidende Rolle für die Erhaltung der Gesundheit des Bienenvolkes und der individuellen Fitness. Die Analyse des Flugverhaltens kann Einblicke in die kognitiven und sensorischen Fähigkeiten von Honigbienen liefern. Ziel der vorliegenden Studie war es, zu untersuchen, ob 900-MHz EMF ausgewählte Verhaltensweisen der Honigbiene beeinflusst. Darüber hinaus wurde untersucht, ob mögliche Veränderungen unmittelbar nach der Exposition sichtbar sind oder erst nach einiger Zeit (verzögerte Wirkung).

Studiendesign und Durchführung:

Rahmen mit Brut wurden ins Labor transportiert und in einen Inkubator gestellt, dessen Bedingungen denen im Bienenstock gleichen. Nach dem Schlüpfen wurden die Honigbienen-Arbeiterinnen in Holzkäfige umgesetzt und in eine Kontrollgruppe sowie

neun Versuchsgruppen aufgeteilt. Die Bienen in den Versuchsgruppen wurden jeweils 15 Minuten, 1 Stunde oder 3 Stunden lang elektromagnetischen Feldern mit 900 MHz und Intensitäten von 12 V/m, 28 V/m und 61 V/m ausgesetzt. Die EMF-Quelle bestand aus einer Plattenantenne, die an einen Verstärker angeschlossen war, der von einem 900-MHz-Hochfrequenzgenerator gespeist wurde, der mit 2G-Frequenzumtastung moduliert war. Unmittelbar nach Ende der Exposition (und erneut 7 Tage später) wurden aus jeder Gruppe Bienen zufällig ausgewählt, um ihr Verhalten 6 Minuten lang mit einer Kamera aufzuzeichnen. Die Verhaltensanalyse wurde mit der Software Noldus Observer XT 9.0 (Wageningen, Niederlande) durchgeführt. Auch wenn 1 Tag alte Bienen noch nicht flugfähig sind, bewertet die Verhaltensanalyse die Flugaktivität anhand von Flügelbewegungen und Bewegungen zwischen den Wänden. Die durchschnittliche Dauer des Verhaltens (wie viel Zeit die Bienen in der Gruppe mit der Ausführung eines bestimmten Verhaltens verbrachten) und die durchschnittliche Anzahl der Vorkommen eines bestimmten Verhaltens (wie oft während der Beobachtung die Individuen in der Gruppe das ausgewählte Verhalten zeigten) wurden analysiert.

Ergebnisse:

Was die durchschnittliche Zeit betrifft, die für ein bestimmtes Verhalten aufgewendet wird, erscheinen die Auswirkungen einer akuten Exposition auf den „individuellen Kontakt“ seltsam: teils verringert, teils verstärkt, jedoch ohne eindeutigen Zusammenhang mit der Feldstärke oder der Expositionsdauer. Eine Woche später ist der individuelle Kontakt in fast allen Expositionsgruppen, mit Ausnahme der Kontrollgruppe, leicht verringert. Ein ähnlicher, wenn auch weniger deutlicher Trend zeigt sich beim Reinigungsverhalten. Das einzige eindeutige Ergebnis dieser Studie ist die Auswirkung der Bestrahlung auf das „Flugverhalten“. Alle exponierten Gruppen zeigten weniger Flugverhalten als die Kontrollgruppe, und der Effekt scheint bei höherer Feldstärke etwas stärker zu sein. Eine Woche später wurden ähnliche Trends festgestellt. Alle exponierten Gruppen zeigten im Vergleich zur Kontrollgruppe weiterhin ein verringertes Flugverhalten, und zwar in etwa gleichem Ausmaß (Reduktion um 25-68 %) wie 7 Tage früher. Die Gruppen mit einer Expositionsdauer von 3 Stunden scheinen stärker betroffen zu sein als die Gruppen mit kürzerer Expositionsdauer. Ähnliche Trends wurden bei der Anzahl der beobachteten Flugverhalten festgestellt.

Schlussfolgerungen:

Dem Autor zufolge zeigt diese Studie, dass 2G-modulierte 900-MHz-Strahlung das Verhalten von Bienen im Vergleich zur Kontrollgruppe geringfügig beeinflusst. Darüber hinaus werden statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Testgruppen festgestellt, die dem Funkfeld unmittelbar nach der Exposition sowie sieben Tage nach der Exposition ausgesetzt waren. Dies deutet darauf hin, dass bestimmte Verhaltensänderungen mög-

licherweise erst zeitverzögert nach der Exposition gegenüber EMF auftreten. Die Studie stellte unmittelbar nach der Exposition, aber auch eine Woche nach der Exposition eine durchgängig verminderte Flugaktivität der Bienen fest. Dies liefert einen weiteren Hinweis darauf, dass hochfrequente 2G-Strahlung eine Schwächung der Bienenvölker durch Verringerung ihrer Nahrungsversorgung verursachen und möglicherweise zur Verschärfung des Phänomens des Bienensterbens beitragen könnte.

Anmerkungen der Redaktion:

Die Studie nutzt eine neue Methode, das Verhalten von Bienen automatisiert zu kategorisieren. Die meisten Befunde waren nicht statistisch signifikant. Jedoch waren insbesondere beim Flugverhalten die Feldstärke und Expositionsdauer klar und quasi-linear mit dem Ausmaß der Reduktion/Störung des Verhaltens verbunden, und dies auch noch eine Woche nach der Exposition. Eine größere Anzahl an Beobachtungen (etwa 3-4mal mehr) würde hier sicherlich statistisch signifikante Unterschiede für fast alle Expositionsgruppen finden. Die in der Studie verwendeten Feldstärken waren allerdings unrealistisch hoch: die niedrigste verwendete Feldstärke von 12 V/m entspricht 380 mW/m², Werte, die nur sehr nahe (im Allgemeinen bei weniger als 10 m Abstand) einer Basisstation zu messen sind, was die Übertragbarkeit der Befunde etwas in Frage stellt. Zukünftige Studien sollten versuchen zu erklären, wieso insbesondere die Flugaktivität durch 2G-Strahlung gestört wird, und dies womöglich auf Ebene der Neurotransmitter betrachten. (AT)



EMF und Pflanzen

Studie zur Bewertung der Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung auf die Lebensfähigkeit von Pollen bei einigen häufig vorkommenden Pflanzenarten unter Anwendung verschiedener Färbemethoden

Sharma A, Bala N, Sharma M, Katnoria JK, Bahel S (2025). Study on evaluation of effects of electromagnetic radiation on pollen viability in some commonly occurring plant species following different staining methods. *Protoplasma*, 263(1), 231-46. <https://doi.org/10.1007/s00709-025-02093-7>

Die Lebensfähigkeit von Pollen ist einer der entscheidenden Faktoren für den Fortpflanzungserfolg, da nicht lebensfähiger Pollen häufig zu einem Scheitern der Fortpflanzung sowie der Gemüseproduktion führen kann. Eine frühere Studie untersuchte die Auswirkungen von Niederfrequenzstrahlung auf die Pollenlebensfähigkeit bei Weizen und stellte fest, dass diese

abnahm. Bislang wurde jedoch keine Studie durchgeführt, um die Auswirkungen von elektromagnetischer Strahlung (EMF) bei unterschiedlichen Leistungsdichten auf die Pollenlebensfähigkeit in Pflanzen zu untersuchen, und keine frühere Studie hat dies unter Feldbedingungen unter Verwendung tatsächlicher Basisstationen getan.

Studiendesign und Durchführung:

Es wurden vier Standorte mit üppiger natürlicher Vegetation in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen ausgewählt, die sich alle in der Umgebung der Guru Nanak Dev University in Punjab, Indien befinden. Da sich die Standorte nahe beieinander befanden, wiesen sie vergleichbare mikroklimatische Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf; alle Pflanzenproben befanden sich in Gärten/Parks, die nach ähnlichen gärtnerischen Praktiken gepflegt wurden. An jedem Standort wurden drei Messungen der Leistungsdichte durchgeführt, die alle zu einer ähnlichen Tageszeit erfolgten. Durchschnittliche Leistungsdichte für jeden Standort: S-1 mit 10 mW/m², S-2 mit 28 mW/m², S-3 mit 55 mW/m² und S-4 mit 150 mW/m². Blüten von 12 verschiedenen Pflanzenarten, darunter Chrysanthemen, Dahlien, Mohn und Rosen, wurden im Februar 2023 an jedem Standort gesammelt, um die Lebensfähigkeit des Pollens zu testen. Für die Pollenlebensfähigkeitsuntersuchungen wurden vier verschiedene Färbemittel verwendet. Alle Experimente wurden dreifach durchgeführt. Zu den Färbemitteln: Aceto-Orcein (AO) färbt das Kernchromatin an, Alexanders Färbemittel (AS) zeigt die Integrität des Zytoplasmas an, Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC) färbt die Zellatmung an und Lugols Färbemittel (LS) hebt den Stärkegehalt jedes Pollenkorns hervor. Etwa 20.000 Pollenkörner wurden unter dem Lichtmikroskop beobachtet und gezählt, was eine ausreichende Stichprobengröße ergab, um selbst subtile Veränderungen der Lebensfähigkeit festzustellen. S-1 wurde als Kontrolle für die statistischen Tests definiert.

Ergebnisse:

Die Pollenlebensfähigkeit reichte von 91 % bis hinunter zu 68 %. Bei bestimmten Stämmen wurde bei allen Arten und allen Stämmen eine Tendenz zu geringerer Lebensfähigkeit bei steigender Leistungsdichte beobachtet. Der Unterschied in der Pollenlebensfähigkeit bei derselben Art, verglichen zwischen S-4 und S-1 (als Kontrolle), betrug mindestens 1 % und erreichte eine maximale Abweichung von 12 %. In vielen Fällen waren die Unterschiede zwischen S-1 und S-4 bei $p < 0,05$ statistisch signifikant. Im Allgemeinen betrug der Unterschied in der Pollenlebensfähigkeit zwischen den stark bestrahlten Proben S-4 und S-1 Kontrollen zwischen 4 und 6 %.

Schlussfolgerungen:


Aceto-Orcein ergab bei allen Arten die höchste Lebensfähigkeit, während TTC durchweg die niedrigsten Werte aufwies. Den Autoren zufolge deutet dies darauf hin, dass die EMR von Basis-

stationen den Stoffwechsel der Pollenkörner stört, da TTC die Zellatmung und die enzymatische Aktivität nachweist, die direkte Indikatoren für die Stoffwechselaktivität sind. Diese Studie stellt eine neuartige und interessante Methodik für die Felduntersuchung vor.

Anmerkungen der Redaktion:

Die festgestellten Effekte sind konsistent und daher wahrscheinlich nicht auf Zufall zurückzuführen. Allerdings sind die Effekte auch recht schwach, da ein Unterschied von 1 % bei einer Pollenlebensfähigkeit von 87 % wahrscheinlich irrelevant ist und der höchste beobachtete Unterschied eine Verringerung um 12 % betrug (von 90 % bei S-1 auf 78 % bei S-4), was über viele Generationen hinweg möglicherweise eine leicht nachteilige Aus-

wirkung haben könnte. Ein Nachteil des Studiendesigns ist der fragwürdige Kontrollstandort S-1, der immer noch eine durchschnittliche EMF-Leistungsdichte von 10 mW/m^2 aufwies und in anderen ähnlichen Feldstudien (in der Nähe von Basisstationen) als „Standort mit hoher Exposition“ gegolten hätte. Ein Kontrollstandort mit weniger als 1 mW/m^2 wäre vorzuziehen gewesen. Die Autoren stellten fest, dass selbst ihre höchste festgestellte Lebensfähigkeit (91 %) unter den Zahlen lag, die üblicherweise für optimale Bedingungen (für diese Art) angegeben werden und sich 99 % Lebensfähigkeit annähern. Daher könnte es sein, dass selbst der Standort S-1 mit der niedrigsten EMF-Belastung nachteilige Auswirkungen auf die Pollenlebensfähigkeit hatte und die Verwendung eines wirklich „EMF-freien“ Standorts als Kontrollstandort stärkere Effekte ergeben hätte. (AT)



Adressen für weitere seriöse Informationen

Diagnose-Funk – Umwelt- und Verbraucherorganisation zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung e. V.

Deutschland:
diagnose-funk.org, info@diagnose-funk.de

Microwave News, USA:
microwavenews.com, louis@microwavenews.com

Prof. Joel Moskowitz, Director of the Center for Family and Community Health at the School of Public Health, Berkeley (USA):

Institutshomepage:
publichealth.berkeley.edu/people/joel-moskowitz
EMF-Homepage: saferemr.com

Prof. Devra Davis (USA):
ehtrust.org, info@ehtrust.org

Prof. Igor Belyaev, Biomedical Research Center of the Slovak Academy of Science, Department of Radiobiology:
biomedcentrum.sav.sk/research-departments/departments-of-radiobiology/?lang=en#1511872382060-6857c1c8-f447,
kurzelinks.de/jmi4

Blog von Prof. Darius Leszczynski (Finnland):
betweenrockandhardplace.wordpress.com

Datenbanken

emfdata.org
emf-portal.de
orsaa.org

