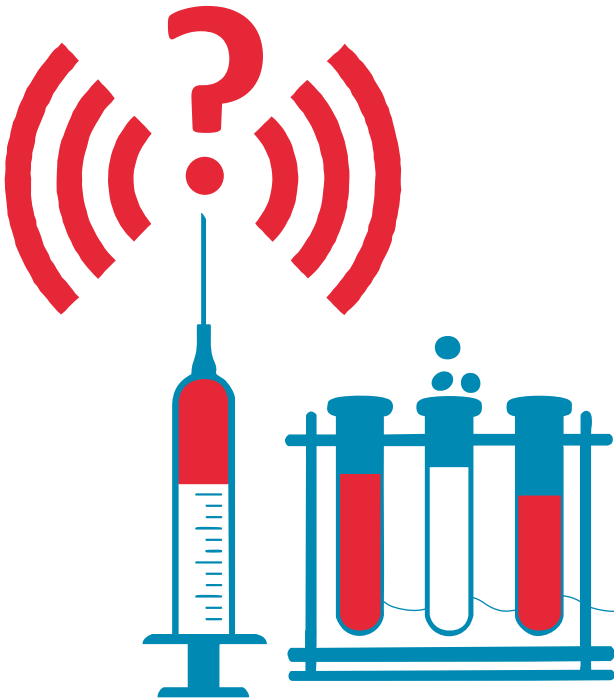


# ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer  
Felder für Umwelt und Gesundheit



## Mobilfunk verändert Erythrozyten

### Kurzfristige in vitro Befeldung von menschlichem Blut mit 5G-Frequenzen: Beeinflussen Geschlecht und Frequenz die Erythrozytenmorphometrie zusätzlich?

Žura N, Vince S, Perić P, Vilić M, Malarić K, Rimac V, Golubić Čepulić B, Vajdić M, Jurak I, Milinković Tur S, Poljičak Milas N, Samardžija M, Nemir J, Telebuh M, Žura Žaja I. (2025). Short-Term In Vitro Exposure of Human Blood to 5G Network Frequencies: Do Sex and Frequency Additionally Affect Erythrocyte Morphometry? *Biomedicines*, 13(2), 478. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13020478>

Diverse Studien weisen darauf hin, dass hochfrequente elektromagnetische Felder Auswirkungen auf Zellproliferation, Genexpression, Zellmembranfunktion sowie auf das Immunsystem, das hämatopoetische System und das Fortpflanzungssystem besitzen. Medizinische Fachkräfte, die mit Blutproben arbeiten, oder Patienten, die mobile Kommunikationsgeräte verwenden,

#### Impressum

ElektrosmogReport Ausgabe 02/2025, 31. Jahrgang

Online Veröffentlichung auf [www.EMFdata.org](http://www.EMFdata.org)

Bestellung Printausgabe:

[shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport](http://shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport), Bestellnr. 52502

#### 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](mailto: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 > 5G Strahlung verändert Erythrozyten

03 > 5G-Mobilfunk schädigt weibliche Fruchtbarkeit

04 > WLAN-Strahlung schädigt Hodengewebe

05 > WLAN-Befeldung stört Nervenreuebildung im ZNS

06 > Mobilfunk verursacht Angststörung  
und verändert Hirnstruktur

07 > Biologische HF-Wirkung auf das Gehirn

08 > 5G und Genexpression

10 > Beeinflusst 5G-Hochfrequenz Wärmeregulation?

11 > Oxidativer Stress bei nicht-thermischen Feldstärken

13 > Radikalpaar – Mechanismus und EMF

15 > Kritik an einer WHO-Studie zu Krebs

17 > WHO Übersicht zu EMF und Fauna und Flora

können Blutproben Mobilfunk aussetzen. Dies kann sich möglicherweise auf die Qualität der Proben und dadurch auf diagnostische Ergebnisse, wie etwa das Blutbild auswirken. Auch medizinische Blutprodukte wie Erythrozyten- oder Thrombozytenkonzentrate können bei Herstellung, Lagerung und Handhabung in Mitleidenschaft gezogen werden, was sich negativ auf Haltbarkeit oder Funktionalität der Produkte auswirken kann. Dies ist für die Transfusionsmedizin von großer Bedeutung. Eine Überproduktion reaktiver Sauerstoffspezies durch Mobilfunk kann die Erythrozytenmembran schädigen und damit die Verformbarkeit verringern. Diese Verformbarkeit ist notwendig, damit die Erythrozyten unbeschädigt enge Blutgefäße passieren können. Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen von Mobilfunk verschiedener Frequenzen auf Parameter des großen Blutbilds, Erythrozytenmorphometrie und Thrombozytenaktivierung menschlicher Blutproben in vitro.

### Studiendesign und Durchführung:

Die analysierten Blutproben wurden von insgesamt 30 gesunden Mitarbeitern (15 Frauen, 15 Männer) des Universitätsklinikum Zagreb, im Alter zwischen 25 und 40, gewonnen. Jede experimentelle Blutprobe besaß ihre eigene Kontrolle, welche gleichzeitig abgenommen wurde. Es wurden insgesamt 3 Blutproben im Abstand von jeweils 14 Tagen abgenommen. Das frisch abgenommene Blut wurde in vitro entweder mit 700 MHz, 2500 MHz oder 3500 MHz (5G) über 2 h mit einer elektrischen Feldstärke von 10 V/m bei Raumtemperatur in einer HCTEM-Zelle befeldet. Die Kontrollproben befanden währenddessen in demselben Raum unter identischen Bedingungen in einer Metallbox aus demselben Material wie die HCTEM-Zelle. Nach der Befeldung wurde ein großes Blutbild angefertigt. Außerdem wurde die Thrombozytenaktivierung mittels Durchflusszytometrie untersucht. Zu guter Letzt erfolgte eine Analyse der Erythrozytenmorphometrie. Dabei wurde das Zytoplasma der Erythrozyten vermessen und Parameter wie Länge, Breite, Fläche und Kontur bestimmt.

### Ergebnisse:

Weder Blutbild noch Thrombozytenaktivierung wiesen nach Befeldung im Vergleich zu den unbefeldeten Kontrollen Unterschiede auf. Die Erythrozytenmorphometrie zeigte jedoch signifikante geschlechts- und frequenzabhängige Veränderungen nach Befeldung. Die gravierendsten Auswirkungen auf die Morphometrie der menschlichen Erythrozyten wurde nach Befeldung mit 700 MHz festgestellt. Sowohl bei den Erythrozyten weiblicher als auch männlicher Probanden nahmen Größe, Kontur und Membranrauheit signifikant zu, wobei die weiblichen Zellen eine gesteigerte Sensibilität gegenüber der Hochfrequenzstrahlung aufwiesen. Bei 2500 MHz und 3500 MHz wur-

den nur bei weiblichen Zellen signifikante Unterschiede der befeldeten Gruppen im Vergleich zu den Kontrollen festgestellt. Diese beinhalteten einen signifikant erhöhten Konturindex bei einem signifikant verminderten Festigkeits- und Formfaktor. Im Allgemeinen neigten die männlichen Erythrozyten eher zu einer stärkeren Membranrauheit und die weiblichen Erythrozyten zu stärkerer Vergrößerung und Rundung. Eine Clusteranalyse ergab auf Grundlage morphometrischer Indikatoren zwei Subpopulationen von Erythrozyten, wobei die erste aus kleineren runden Erythrozyten mit glatten Membranen bestand, während die zweite Subpopulation größere Erythrozyten mit rauen Membranen aufwies. Nach Befeldung befanden sich im Vergleich zu den Kontrollen mehr Erythrozyten in der zweiten Subpopulation und dementsprechend weniger in der ersten. Dieser „Shift“ war jedoch nur für 700 MHz und 3500 MHz statistisch signifikant.

### Schlussfolgerungen:

Die kurzzeitige Mobilfunkbefeldung mit drei unterschiedlichen Frequenzen, darunter 5G (3500 MHz), führte zu signifikanter Vergrößerung, Rundung und Membranrauheit der Erythrozyten. Anhand der erhobenen Daten ist kein Rückschluss darüber

**„Die Autoren gehen von einer mechanischen Beschädigung des Zytoskeletts, einhergehend mit einer erhöhten Membrandurchlässigkeit und Verformbarkeit der Erythrozyten durch den Mobilfunk aus.“**

möglich, ob die Veränderungen vorübergehend und reversibel sind. Die schädlichen Auswirkungen des Mobilfunks sind bei weiblichen Erythrozyten, welche grundsätzlich eine größere Verformbarkeit aufweisen, stärker ausgeprägt. Die Autoren gehen von einer mechanischen Beschädigung des Zytoskeletts, einhergehend mit einer erhöhten Membrandurchlässigkeit

und Verformbarkeit der Erythrozyten durch den Mobilfunk aus. Der „Shift“ hin zu einer größeren Subpopulation mit aufgerauten Membranen sei außerdem ein Indikator für eine beschleunigte Erythrozyten Alterung durch den Mobilfunk.

### Anmerkung der Redaktion:

Das allgemeine Studiendesign (dreimalige Probennahme, Probenhandling, alle Analysen in Duplikaten durchgeführt) ist positiv hervorzuheben, allerdings wäre eine Scheinbefeldung der Kontrollen wünschenswert gewesen. Eine SAR-Bestimmung und eine zusätzliche Normalisierung der elektromagnetischen Felder auf einen einheitlichen SAR-Wert anstatt lediglich einer einheitlichen Feldstärke hätte möglicherweise zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge beitragen können. Irritierend fällt auf, dass die Autoren in ihrer gesamten Publikation von 5G-Mobilfunk sprechen, wobei lediglich eine der drei Frequenzen 5G-assoziiert ist (3500 MHz). Eine über die der Autoren hinausgehende Einordnung der Ergebnisse in vorhandene Literatur fällt schwer, da diese bereits umfangreich durchgeführt wurde und die Studienlage im Allgemeinen als dünn zu bezeichnen ist. Die aufgestellten Hypothesen sind, insbesondere ob ihrer Brisanz, ernstzunehmen. (RH)



### Mobilfunk schädigt weibliche Fruchtbarkeit

## Auswirkung von 700-MHz-Hochfrequenzbefeldung (unteres 5G-Frequenzband) auf die Fortpflanzungsparameter weiblicher Wistar-Ratten

Jha N, Sarsaiya P, Tomar AK, Pardhiya S, Nirala JP, Chaturvedi PK, Gupta S, Rajamani P. (2025). Effects of 700 MHz radiofrequency radiation (5 G lower band) on the reproductive parameters of female Wistar rats. *Reproductive Toxicology*, 135(March), 108910. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2025.108910>

Die Einführung von 5G-Technologien hat Bedenken hinsichtlich möglicher biologischer Wirkungen geschürt. Neben möglichen krebserregenden Wirkungen steht die Gesundheit der Fortpflanzungsorgane im Fokus. Während internationale Grenzwerte für Hochfrequenz primär thermische Effekte berücksichtigen, bleiben nicht-thermische Wirkungen und Langzeitfolgen sub-thermischer Befeldung unzureichend erfasst. Das untere 5G-Frequenzband (600 – 900 MHz) ist aufgrund seiner weiten Verbreitung und Nutzung in Ländern wie Indien von besonderem Interesse. Bisherige Studien zu Wirkungen von Mobilfunk auf die Gesundheit der Fortpflanzungsorgane sind kontrovers, wobei die Untersuchung der weiblichen Fortpflanzungsorgane unterrepräsentiert ist. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie die Auswirkungen von nicht-thermischer 700-MHz-Befeldung auf das weibliche Fortpflanzungssystem in dem Modellorganismus Ratte.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Befeldung der weiblichen Wistar-Ratten erfolgte in abgeschirmten Kammern mit 700-MHz ohne Frequenzmodulation bei einer Leistungsdichte von  $7,192 \text{ W/m}^2$  ( $\text{SAR} = 0,375 \text{ W/kg}$ ). Dabei wurde zwischen Kurzzeitbefeldung: 6 h/Tag über 10 Tage ( $n = 6$ ) und Langzeitbefeldung: 4 h/Tag über 60 Tage ( $n = 8$ ) unterschieden. Jede befeldete Gruppe wurde mit schein- und unbefeldeten Kontrollen verglichen. Die Autoren untersuchten reproduktive Parameter: Östruszyklus-Länge, Sexual-Hormonspiegel (Östradiol, Progesteron, Testosteron); Histopathologie der Ovarien; Oxidative Stressparameter: Lipidperoxidation (MDA), antioxidative Schutzenzyme (SOD), antioxidative Kapazität (FRAP) und Genotoxizität: DNA-Schäden (Komettest).

### Ergebnisse:

Es wurden in beiden veränderten Gruppen im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollen signifikante Veränderungen der Östruszyklus-Länge beobachtet. Das Serumtestosteron hingegen war in beiden Gruppen im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollen leicht, aber statistisch signifikant erhöht. Östradiol und Progesteron blieben unverändert. MDA war in beiden befeldeten Gruppen signifikant gesteigert, SOD und FRAP signifikant verringert. Histopathologisch wurden bei der Langzeitbefeldung signifikan-

te Veränderungen (zystische Follikel, abnormale Gefäßstruktur) beobachtet. Es gab keine Hinweise auf eine genotoxische Wirkung des Mobilfunks.

### Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Studie legen nahe, dass sowohl die kurz- als auch die langfristige Mobilfunkbefeldung oxidativen Stress in den Ovarien verursacht. Signifikante histopathologische Veränderungen wurden hingegen nur nach langfristiger Befeldung beobachtet, was auf eine kumulative Wirkung des Mobilfunks hindeuten könnte. Die Erhöhung des Testosteronspiegels war zwar statistisch signifikant, erreichte jedoch kein pathologisches Ausmaß. Obwohl eine schädigende Wirkung nicht auszuschließen ist, deutet das Ausbleiben signifikanter Veränderungen im Östruszyklus darauf hin, dass die hormonellen Veränderungen keine ausschlaggebenden Veränderungen im gesamten Reproduktionszyklus der Versuchstiere auslösten. Die Autoren betonen, dass nicht-thermische Wirkungen auch unterhalb von aktuellen Grenzwerten Risiken für die Fortpflanzungsgesundheit bergen können. Weitere Forschung zu Dosis-Wirkungsbeziehung und mechanistischen Aufklärung sei unerlässlich.

### Anmerkungen der Redaktion:

Das Studiendesign überzeugt durch eine alltagsrelevante nicht-thermische Befeldung, Kombination hormoneller, histologischer und oxidativer Analysen sowie umfangreichen Kontrollen (un- und scheinbefeldet). Die Induktion oxidativen Stresses durch Mobilfunk mit einhergehenden histopathologischen Veränderungen wird in der Literatur wiederholt beschrieben und ausführlich diskutiert, insbesondere in Bezug zu Auswirkungen auf Fortpflanzungsorgane (Altun et al., 2018; Kaur et al., 2023; Yadav et al., 2021) mobile phones, televisions, microwaves, radio, and wireless devices, etc., have become an integral part of our daily lifestyle. All these technologies employ radiofrequency (RF). Im Hinblick auf die hormonellen Veränderungen wäre die Untersuchung von Steroidsynthese-Signalwegen wünschenswert gewesen, möglicherweise hätte dies zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge beitragen können. Die Aussagekraft zur 5G-Spezifität ist limitiert, da mit 700 MHz lediglich eine Frequenz ohne Signalmodulation untersucht wurde. Die Studie liefert dennoch wichtige Hinweise auf reproduktive Risiken durch sub-thermische Hochfrequenzbefeldung. (RH)

Altun G, Deniz ÖG, Yurt KK, Davis D, Kaplan S. (2018). Effects of mobile phone exposure on metabolomics in the male and female reproductive systems. *Environmental Research*, 167(February), 700–707. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.031>

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>

Yadav H, Rai U, Singh R. (2021). Radiofrequency radiation: A possible threat to male fertility. *Reproductive Toxicology* (Elmsford, N.Y.), 100, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2021.01.007>



### WLAN-Router schädigt Hodengewebe

## Der Einfluss der Befeldungsdauer von 2,45-GHz-WLAN auf Spermienqualität und Histopathologie der Hoden: Eine Untersuchung peroxidativer Schäden

Jamaludin N, Ibrahim SF, Jaffar FHF, Zulkefli AF, Osman K. (2025). The Influence of 2.45 GHz Wi-Fi Exposure Duration on Sperm Quality and Testicular Histopathology: An Exploration of Peroxidative Injury. *Antioxidants*, 14(2), 179. <https://doi.org/10.3390/antiox14020179>

Vor dem Hintergrund ubiquitärer Nutzung von WLAN-Technologie ist es dringlicher denn je, potenzielle Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu verstehen. Unter den zahlreichen möglichen WLAN-Wirkungen ist die Beeinflussung des männlichen Fortpflanzungssystems in den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Fokus gerückt. Ein möglicher Mechanismus, wie nicht-ionisierende WLAN-Strahlung die männlichen Fortpflanzungsorgane schädigen könnte, ist die Induktion oxidativen Stresses. Eine Konsequenz von oxidativem Stress ist Lipidperoxidation, bei der unter anderem Malondialdehyd (MDA) entsteht. MDA ist für seine mutagenen Eigenschaften be- und als Indikator für oxidative Radikale anerkannt. Die vorliegende Studie adressiert die Fragestellung, inwiefern 2,45-GHz-WLAN eines kommerziellen Routers oxidative Schäden, Spermienqualität und histopathologische Veränderungen im Hodengewebe von Ratten verursachen kann. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk der Auswirkung verschiedener Befeldungsdauern.

### Studiendesign und Durchführung:

Insgesamt wurden 24 männliche Sprague-Dawley-Ratten in 4 Gruppen unterteilt ( $n = 6$ ) und über 8 Wochen befeldet bzw. im Falle der Kontrollgruppe scheinbefeldet. Die 3 experimentellen Gruppen unterschieden sich in ihrer Expositionsdauer von 4 h, 8 h und 24 h täglich. Als Strahlungsquelle diente ein handelsüblicher 2,45-GHz-Router, der in 20 cm Abstand zu den Rattenkäfigen positioniert wurde. (Dieses Befeldungssetup impliziert die Untersuchung nicht-thermischer WLAN-Wirkungen, Anm. d. Red.) Die Befeldung wurde in einem abgeschirmten Raum durchgeführt. Nach Beendigung der Befeldungsphase wurden Spermienparameter (Konzentration, Motilität, Viabilität), oxidative Stressmarker (Serum-MDA) sowie Histopathologie des Hodengewebes (Johnsen-Score, Durchmesser der Hodenkanälchen, Epithelhöhe) untersucht.

### Ergebnisse:

Bei allen Befeldungsdauern wurde eine signifikante Erhöhung der MDA-Konzentrationen, einhergehend mit signifikanten Verschlechterungen der untersuchten Spermienparameter

sowie signifikanten histopathologischen Veränderungen beobachtet. Bemerkenswerterweise waren die WLAN-Auswirkungen bei der 4-stündigen täglichen Befeldung am stärksten ausgeprägt. Bei den längeren Expositionen (8 und 24 h) normalisierten sich die untersuchten Parameter schrittweise und dauerabhängig.

### Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Autoren stellen die weit verbreitete Annahme, dass längere Befeldungsdauern mit schädlicheren Auswirkungen korrelieren, infrage. Während die kürzeste Befeldungsdauer die gravierendsten Effekte auslöst, schlussfolgern die Autoren, dass durch kompensatorische Prozesse bei den längeren Befeldungsdauern eine partielle Regeneration ermöglicht wird. Eine vollständige Erholung blieb jedoch aus. Interessanterweise korreliert der oxidative Stressmarker MDA konsistent mit den Spermienparametern bzw. der Histopathologie. Die Wissenschaftler fordern weitere und tiefgreifendere Forschung zu molekularen Mechanismen sowie kombinierter Exposition mit anderen Frequenzen oder Umwelteinflüssen.

### Anmerkungen der Redaktion:

Die kontrollierte Versuchsumgebung inklusive Abschirmung des Versuchsraumes, scheinbefeldeter Kontrolltiere und alltagsnaher Befeldungsparameter sind an dieser Studie positiv hervorzuheben. Da ein kommerzieller WLAN-Router als Strahlungsquelle eingesetzt wurde und die empfohlenen Grenzwerte vor thermischen Wirkungen schützen, ist wie oben bereits beschrieben von nicht-thermischen Wirkungen des 2,45-GHz-WLANs auszugehen. Die systematische Variation der Befeldungsdauern ermöglicht eine dynamische Betrachtung von Schädigung und Regeneration. Inwiefern eine 24/7 Befeldung mit einer menschlichen Nutzung vergleichbar ist, ist durchaus infrage zu stellen, aber 4- bzw. 8 h täglich sind als realistisch einzustufen.

Für ein tieferes Verständnis molekularer Mechanismen wäre eine Untersuchung von antioxidativen Signalkaskaden oder Schutzenzymen wünschenswert gewesen. Die Stichprobengröße von  $n = 6$  reicht aus, um statistische Signifikanz zu erreichen, hätte jedoch in Anbetracht der Komplexität der Interaktion elektromagnetischer Felder mit biologischen Geweben größer gewählt werden dürfen. Zusammenfassend liefert die Studie wertvolle Hinweise auf eine zeitabhängige Wirkung von WLAN-induziertem oxidativen Stress und mögliche kompensatorische Effekte, welche in Säugetieren auftreten können. (RH)

**„Bei allen Befeldungsdauern wurde eine signifikante Erhöhung der MDA-Konzentrationen, einhergehend mit signifikanten Verschlechterungen der untersuchten Spermienparameter sowie signifikanten histopathologischen Veränderungen beobachtet.“**



## WLAN-Befeldung stört Nervenreuebildung im Zentralen Nervensystem

### Auswirkungen von Mikrowellenstrahlung auf postnatale Neurogenese und Verhalten von Ratten, die pränatal befeldet wurden

Popovičová A, Račeková E, Martončíková M, Fabianová K, Raček A, Žideková M. (2024). Effect of microwave radiation on adult neurogenesis and behavior of prenatally exposed rats. *IBRO Neuroscience Reports*, 17(April), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2024.08.007>

Es finden sich immer mehr Belege dafür, dass die Neubildung von Nervenzellen auch im erwachsenen menschlichen Gehirn stattfindet. Es ist bekannt, dass die sogenannte postnatale Neurogenese im adulten Säugetiergehirn in zwei Hauptarealen stattfindet: 1) im subventrikulären Bereich der lateralen Ventrikel (mit Migration über den rostralen Migrationsstrom [RMS]) und 2) in der subgranulären Zone (SGZ) des Gyrus dentatus (DG). Beim DG handelt es sich um einen Teil des Hippocampus. Adulte Neurogenese ist entscheidend für kognitive und emotionale Prozesse und Veränderungen der Neurogenese sind mit neurodegenerativen Krankheiten assoziiert. Neben anderen Signalmolekülen ist auch das freie Radikal Stickstoffmonoxid NO an der Regulation der adulten Neurogenese beteiligt. Frühe Studien der Arbeitsgruppe haben gezeigt, dass hochfrequente elektromagnetische Felder die Neurogenese in der olfaktorischen Region von Ratten nachteilig beeinflussen kann. In der vorliegenden Studie untersuchen die Autoren die Auswirkungen von 2,45-GHz-Befeldung im Uterus auf die postnatale Neubildung von Nervenzellen.

#### Studiendesign und Durchführung:

Die Muttertiere der später untersuchten, intrauterin befeldeten Wistar-Ratten, wurden während ihrer gesamten Trächtigkeit 2 h pro Tag mit einem gepulsten 2,45-GHz-Feld und einer Leistungsdichte von 28 W/m<sup>2</sup> (SAR-Wert: 1,73 W/kg) befeldet. Die Kontrollen wurden schein-exponiert. Die Nachkommen (n = 12) wurden entweder im jugendlichen Alter (5 Wochen) oder als erwachsene Tiere (3 Monate) analysiert. In beiden Altersgruppen wurden RMS und DG immunohistochemisch (Ki-67 für Zellteilung, Fluoro-Jade C für Zelltod), und NADPH-Diaphorase-Histochemie (nitrergische Neuronen) quantitativ untersucht. Bei den adulten Tieren wurden außerdem Verhaltenstest (Offener Feldtest, erhöhtes-Plus-Labyrinth und Hell-Dunkel-Kammer) verblindet durchgeführt.

#### Ergebnisse:

Sowohl bei den juvenilen als auch den adulten Tieren waren die untersuchten Neurogenese-Parameter signifikant verändert. Bei den Jugendlichen wurde nach Befeldung eine signifikante Steigerung proliferativer Zellen, sowohl im RMS (Unterregion „Ellbogen“) als auch im DG festgestellt. Gleichzeitig war der Zelltod im RMS signifikant gesteigert. Auch die Anzahl der Neuronen, die NO als Neurotransmitter freisetzen (nitrergische Neuronen) war im RMS signifikant vermindert, einhergehend mit morphologischen Veränderungen der Neuronen, die auf eine Reifungsverzögerung hindeuten. Im Gegensatz dazu war der Anteil proliferativer Zellen bei den befeldeten Erwachsenen im Vergleich zu ihren scheinbefeldeten Kontrollen sowohl im RMS als auch im DG signifikant verringert. Der Zelltod war im RMS auch bei den Erwachsenen signifikant erhöht, im DG wurden keine Unterschiede zwischen befeldeten Tieren und Kontrollen festgestellt. Der Befund bezüglich der nitrergischen Neuronen war identisch zu den juvenilen Tieren: signifikant verringerte Anzahl und veränderte Morphologie, die auf eine Differenzierungsverzögerung hindeuten. Die Befeldung führte bei den adulten Tieren zu einem reduzierten Angstverhalten und Hyperaktivität.

#### Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Studie weisen darauf hin, dass eine pränatale WLAN-Befeldung langfristige Störungen der postnatalen Neurogenese verursachen kann. Die Störung der Zellteilung weist auf biphasisches Muster, mit initialem Anstieg und späterem erschöpfungsbedingtem Abfall. Der erhöhte Zelltod im RMS war bei Jugendlichen und Erwachsenen persistent. Die Verhaltensänderungen korrelieren mit den Veränderungen der Neurogenese. Die Autoren sehen Analogien zu ADHS-ähnlichem Verhalten beim Menschen. Sie betonen die Relevanz ihrer Befunde angesichts ubiquitärer Hochfrequenzbelastung und steigender ADHS-Fälle, äußern jedoch auch, dass eine Übertragbarkeit der Daten auf den Menschen weiterer, tiefgreifender Studien bedarf.

#### Anmerkungen der Redaktion:

Das Expositionsdesign (gepulstes 2,45-GHz-EMF, SAR-Wert < 2 W/kg, 2 h/Tag, dosimetrische Verifikation, Verwendung von Scheinkontrollen) und die Vielschichtigkeit der Analysen (Histologie, Verhalten) sind positiv zu erwähnen. Die Verwendung juveniler und adulter Tiere deckt außerdem ein mögliches biphasisches Muster auf und entwicklungsabhängige Wirkungen ab. Auch die Verblindung bei den Verhaltenstests steigert die Robustheit der generierten Daten. Da die Geschlechterverteilung zwischen befeldeten und scheinbefeldeten Gruppen identisch ist, sind mögliche geschlechterspezifische Verzerrungen der untersuchten Parameter unwahrscheinlich. Die Analogie zwischen ADHS beim Menschen und dem beobachteten hyperaktiven Verhalten scheint jedoch eher spekulativer Natur. (RH)

**„Sowohl bei den juvenilen als auch den adulten Tieren waren die untersuchten Neurogenese-Parameter signifikant verändert.“**



## Mobilfunk verursacht Angststörung und verändert Hirnstruktur

# Mögliche Auswirkungen von Hochfrequenz auf Angstkonditionierung, perivaskulären Raum des Hippocampus, Apoptose und die Mikroarchitektur der Nebennieren bei Ratten

Narayanan SN, Kumar RS, Kumar N, Prabhakar P, Nayak SB, Bhat PG. (2025). Possible effects of radiofrequency electromagnetic radiation on contextual fear conditioning, hippocampal perivascular space, apoptosis and adrenal gland microarchitecture in rats. *Behavioural Brain Research*, 481(January), 115424. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2025.115424>

Zahlreiche Studien deuten auf mögliche biologische, nicht-thermische Auswirkungen von mobiler Telekommunikationstechnologie, insbesondere auf das Gehirn hin. Von besonderem Interesse ist der Hippocampus, der sich im Temporallappen befindet und als Teil des limbischen Systems für eine Vielzahl von Funktionen verantwortlich ist. Er spielt eine wesentliche Rolle bei der Bildung des episodischen Gedächtnisses (Raum-Zeit) und der Hemmung bestimmter Verhaltensweisen. Die vorliegende Publikation untersucht die Auswirkung von 900-MHz-Mobilfunk auf Verhaltensänderungen, das Stressreaktionssystem (Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse; HPA-Achse), sowie Veränderungen in der Hippocampus- bzw. Nebennierenrindensstruktur am Modellorganismus Ratte. Ziel ist es nicht-thermische Wirkungen von Mobilfunk zu charakterisieren.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Studie umfasst 36 junge männliche Wistar-Ratten, aufgeteilt in unbefeldete Kontrollgruppe, scheinbefeldete Kontrollgruppe und befeldete Kontrollgruppe (n = 12). Als Strahlungsquelle diente ein kommerzielles GSM-Mobiltelefon im Lautlos-Modus, welches zentral im Käfig platziert wurde und über einen Autodialer einmal täglich, 50-mal pro Stunde über 1 h angerufen wurde. Die Befeldungsperiode betrug 4 Wochen (1 h/Tag). Das Mobiltelefon operierte mit 900 MHz, der Hersteller gab den SAR-Wert mit 1,15 W/kg an. Die maximale gemessene Leistungsdichte betrug 1,466 W/m<sup>2</sup>. Die Verhaltensanalysen erfassten die kontextuelle Furchtkonditionierung (Passive-Avoidance-Test), was Rückschlüsse auf Angstverhalten und Gedächtniskonsolidierung ermöglicht. Im Hippocampus wurden perivaskuläre Räume sowie Apoptose (n = 3) untersucht. Die Nebennieren wurden qualitativ histopathologisch analysiert.

### Ergebnisse:

Die befeldeten Tiere zeigten im Vergleich zu den beiden Kontrollgruppen hyperaktives und angstähnliches Verhalten. Auch

die Gedächtnisleistung war signifikant beeinträchtigt. Die perivaskulären Räume waren im Vergleich zu den Kontrollgruppen vergrößert, es wurde jedoch lediglich im Vergleich zur unbefeldeten Kontrollgruppe statistische Signifikanz erreicht. Die Zahl der apoptotischen Zellen in der CA3-Region des Hippocampus wiesen einen erhöhten Trend auf, der ebenfalls keine statistische Signifikanz erreichte. Qualitativ wurden in der Zona fasciculata der Nebenniere apoptotische Zellveränderungen, lymphozytäre Infiltrate und gestaute Sinusoide beobachtet, andere Regionen der Nebennierenrinde sowie das Nebennierenmark wiesen keine Veränderungen nach Befeldung auf.

### Schlussfolgerungen:

Die Studie legt nahe, dass die chronische, nicht-thermische Mobilfunkbefeldung zu signifikanten Veränderungen des Angstgedächtnisses führte. Dies ging einher mit strukturellen Veränderungen des Hippocampus und der Nebennierenrinde. Die Autoren hypothetisieren, dass eine HPA-Achsen-Dysregulation zugrunde liegen könnte. Als Schwäche ihrer Studie nennen sie, dass keine Stressmarker wie z.B. Corticosteron analysiert wurden, um diese Hypothese zu untermauern. Weitere Arbeiten seien erforderlich, um beteiligte Signalwege zu identifizieren und Stresshormonspiegel zu messen.

### Anmerkungen der Redaktion:

Das grundsätzliche Studiendesign mit realitätsnaher Befeldungsquelle (kommerzielles Mobiltelefon), konservative Befeldungsdauer, schein- und unbefeldeten Kontrollen und einem multidisziplinären Ansatz (Verhalten, Histologie) ist positiv hervorzuheben und stärkt die Aussagekraft der Studie. Negativ anzumerken ist jedoch die kleine Probenanzahl (n = 3) bei der Apoptoseanalyse, welche nicht klar in der Publikation kommuniziert wird, sondern dem Methodenteil zu entnehmen ist. Dies wirkt intransparent, und wirkt sich doppelt negativ auf die Studie aus, da sich trotz geringer Probenzahl ein Trend zeigte, welcher bei mehr Proben möglicherweise statistische Signifikanz erreicht hätte. Die Studie bestätigt frühere Publikationen, welche Schädigungen des Hippocampusgewebe durch nicht-thermische Mobilfunkbefeldung beschreiben. So wurden Störungen der HPA-Achse bzw. Angststörungen (Zheng et al., 2023), Beeinträchtigungen der synaptischen Plastizität bzw. des Gedächtnisses (Karimi et al., 2018) und Veränderungen von molekularen Signalwegen (Tan et al., 2022) in Säugetieren dokumentiert. (RH)

Karimi N, Bayat M, Haghani M, Saadi HF, Ghazipour GR. (2018). 2.45 GHz microwave radiation impairs learning, memory, and hippocampal synaptic plasticity in the rat. *Toxicology and Industrial Health*, 34(12), 873–883. <https://doi.org/10.1177/0748233718798976>

Tan B, Canturk Tan F, Yalcin B, Dasdag S, Yegin K, Yay AH. (2022). Changes in the histopathology and in the proteins related to the MAPK pathway in the brains of rats exposed to pre and postnatal radiofrequency radiation over four generations. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 126, 102187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2022.102187>



Zheng R, Zhang X, Gao Y, Gao D, Gong W, Zhang C, Dong G, Li Z. (2023). Biological effects of exposure to 2650 MHz electromagnetic radiation on the behavior, learning, and memory of mice. *Brain and Behavior*, 13(6), 1–13. <https://doi.org/10.1002/brb3.3004>



## Biologische HF-Wirkung auf das Gehirn

# Beeinflussung von Hirnerkrankungen durch Hochfrequenz als berührungslose neuronale Stimulationstechnologie

Sun S, Bok J, Jang Y, Seo H. (2025). Brain Disease-Modifying Effects of Radiofrequency as a Non-Contact Neuronal Stimulation Technology. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijms26052268>

In jüngster Zeit häufen sich die Hinweise, dass eine Befeldung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) wichtige physiologische und kognitive Prozesse beeinflussen kann, darunter Gehirnaktivität, kognitive Fähigkeiten, Schlaf und sogar Stoffwechselregulation. Diese komplexen Wechselwirkungen zwischen Hochfrequenz und biologischen Systemen wurden in verschiedenen Versuchsmodellen nachgewiesen, darunter in-vitro-Studien, Tiermodelle und klinische Studien am Menschen. Diese Studien deuten darauf hin, dass Hochfrequenz u.a. in der Lage ist, die neuronale Erregbarkeit und den Glukosestoffwechsel zu modulieren, was möglicherweise einen therapeutischen Ansatzpunkt für die Behandlung von Krankheiten wie Morbus Alzheimer bietet. In der vorliegenden Übersichtsarbeit werden die neuesten Erkenntnisse zu Auswirkungen von HF-EMF, mit Fokus auf einen therapeutischen Nutzen in Form einer nicht-invasiven, berührungslosen Stimulationstechnologie vorgestellt. Es wird analysiert, wie Hochfrequenz neurophysiologische Prozesse, wie Neurogenese, Erregbarkeit und Stoffwechsel sowie kognitive Funktionen, Verhalten und Schlaf beeinflussen kann.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Übersichtsarbeit folgt einem narrativen Ansatz ohne explizite Angabe eines Rechercheprotokolls oder Auswahlkriterien. Eingeschlossen wurden experimentelle, peer-reviewte Studien zwischen 2000 und 2025 zu Hochfrequenzwirkung auf Zellkulturen, Tiermodelle (Fokus auf transgene Alzheimer-Mausmodelle) und Humanstudien. Das inhaltliche Augenmerk

der Primärstudien waren neurodegenerative Pathologien, insbesondere Alzheimer. Die Autoren legten Wert auf klar definierte Expositionsparameter, u.a. Angabe von SAR-Werten und Frequenz.

### Ergebnisse:

Die Hochfrequenzwirkungen auf die analysierten neurophysiologischen Prozesse sind von ambivalenter Natur. Es werden sowohl positive Auswirkungen, wie verminderte A $\beta$ -Sekretion bzw. Plaques, verringerte ROS, erhöhte kognitive Leistungen, als auch negative Auswirkungen, wie erhöhter oxidativer Stress, Apoptose, und EEG-Modulation (Mensch) dokumentiert. Von den insgesamt 57 Studien zu den Auswirkungen von EMF berichten 81 % von Effekten, während 19 % keine Wirkung finden. 60 % der Gesamtstudien (34 von 57) untersuchen SAR-Werte  $\leq 2$  W/kg, bei denen von nicht-thermischen Wirkungen ausgegangen werden kann. Auch hier wird in der Mehrzahl der Studien (88 %) eine biologische Wirkung der Hochfrequenz beschrieben, unabhängig von gesundheitsschädigender oder -förderlicher Wirkung. Bei den Humanstudien finden sich besonders oft EEG- und Schlafveränderungen. Biologische Wirkungen (verbessertes deklaratives Gedächtnis) werden beim Menschen sogar bei einem SAR-Wert von lediglich 6,4 mW/kg beobachtet.

### Schlussfolgerungen:

Die Autoren schlussfolgern, dass Hochfrequenzbefeldung in der Lage sein kann, für eine Neurostimulation zu sorgen und verschiedene Gehirnaktivitäten zu beeinflussen. Die Forschungslage sei jedoch sehr begrenzt und je nach Befeldungsbedingungen könnten gegensätzliche Ergebnisse auftreten. Dies unterstreiche die Notwendigkeit weiterer klinischer Studien zur Klärung der potenziellen Auswirkungen.

### Anmerkungen der Redaktion:

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich nicht um eine systematische Review oder Meta-Analyse, die Autoren wollten viel mehr der Hypothese nachgehen, ob sich Hochfrequenz dazu eignet, neuronale Stimulationen im therapeutischen Kontext vorzunehmen. Es sollte keine Risikobewertung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern durchgeführt werden. Dementsprechend erfolgte die Studienauswahl nicht transparent, was die quantitative Aussagekraft stark einschränkt. Nichtsdestotrotz, oder gerade aufgrund ihres medizinischen Ansatzes, weist die Publikation darauf hin, dass nicht-thermische, biologische Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern existieren. Diese biologischen Wirkungen könnte man sich zukünftig in Form von kontaktfreier, neuronaler Stimulation zur Demenztherapie nützlich machen. (RH)



## 5G und Genexpression

# Wiederholte Kopfexposition mit einem 5G-3,5 GHz-Signal verändert nicht das Verhalten, aber die intrakortikale Genexpression bei erwachsenen männlichen Mäusen

Lameth J, Royer J, Martin A, Marie C, Arnaud-Cormos D, Lévêque P, Poirier R, Edeline JM, Mallat M (2025). Repeated Head Exposures to a 5G-3.5 GHz Signal Do Not Alter Behavior but Modify Intracortical Gene Expression in Adult Male Mice. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025 Mar 10;26(6):2459. <https://doi.org/10.3390/ijms26062459>

Die Einführung und Ausweitung von 5G-Telekommunikationssystemen erfordert eine Neubewertung der biologischen Auswirkungen dieser Technologie auf das Gehirn. Anhand von Nagetiermodellen lassen sich spontane Verhaltensweisen und emotionale Zustände oder kognitive Fähigkeiten wie Lernen und Gedächtnis beurteilen und die zellulären und molekularen Mechanismen analysieren, die für die durch Umwelteinflüsse ausgelösten Verhaltensänderungen verantwortlich sind. Hinsichtlich der Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (RF-EMF) auf die Lernfähigkeit und das räumliche Gedächtnis von Nagetieren zeigen veröffentlichte Arbeiten heterogene Ergebnisse, die entweder keinen Effekt oder im Gegensatz dazu signifikante Veränderungen der Lern- oder Gedächtnisfähigkeiten berichten. Diese Vielfalt spiegelt höchstwahrscheinlich den Einfluss einer Kombination von Versuchsparametern wider, die von Studie zu Studie variieren. Obwohl 2G-, 3G- und 4G-Systeme nach wie vor in Gebrauch sind, nimmt die Nutzung von 5G-Mobilfunkkommunikation schnell zu und wird bis Ende 2024 voraussichtlich 2,3 Milliarden Abonnements erreichen. In der hier besprochenen Studie wurde untersucht, ob eine einmonatige chronische Exposition mit einem 5G-3,5-GHz-Signal (1 Stunde/Tag; 5 Tage pro Woche) das Verhalten, Gedächtnis und die intrazerebrale Genexpression von Mäusen verändern kann.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Experimente wurden mit sieben Wochen alten männlichen C57BL/6 J-Mäusen (n = 32) durchgeführt. Die Exposition wurde an wachen, am Kopf festgebundenen Tieren durchgeführt, um eine homogene tägliche Kopfexposition zu gewährleisten. Jeden Tag wurde eine Dipol-Antenne 5 mm vom Kopf der Tiere entfernt in einer festen/standardisierten Position für eine Stunde in der Nähe des rechten temporalen Kortex positioniert. Das Expositions-System umfasste einen Hochfrequenz-Generator, um ein „echtes“ 5G-moduliertes 3,5 GHz-Signal zu erzeugen, das dem 5G NR Standard entspricht. Jeder exponierten Maus (n

= 12) wurde eine pseudoexponierte (PSD-)Maus (n = 12) unter identischen Bedingungen gegenübergestellt. Die spezifischen Absorptionsraten (SAR) wurden sowohl numerisch mit einem simulierten Mausmodell als auch experimentell in einem homogenen Mausmodell mit einer Luxtron-Sonde bestimmt. Der Unterschied zwischen den beiden SAR-Werten betrug weniger als 30 %. Nach 20 Tagen 5G-Exposition (1 Stunde/Tag) wurden die Bewegungsaktivitäten in einem offenen Feld (OF)-Test mit denen von pseudoexponierten Mäusen verglichen. Ebenso wurden die Lern- und Gedächtnisfähigkeiten mit Objekterkennungs- und Objektlokalisierungs-Aufgaben getestet. Eine Kamera, die an ein Video-Tracking-System angeschlossen war, wurde über dem OF angebracht, um die Aktivität der Mäuse aufzuzeichnen. Nach Beendigung der Verhaltens-Tests wurden die Gehirne schnell aus dem Schädel entfernt (nach Betäubung), und die mRNA-Sequenzierung wurde unter Verwendung von Gewebe durchgeführt, das von 5G-exponierten (n = 7) und pseudoexponierten (n = 8) Tieren entnommen wurde, die über 6 Wochen einer 27-stündigen Exposition oder einer PSD-Exposition unterzogen worden waren. Das mRNA-Ganzgenom-Profilierung wurde in symmetrischen Bereichen der rechten und linken Großhirnrinde durchgeführt, die sich aufgrund der lokalen Energie-Deposition unterschieden. Die Unterschiede in den Transkriptionsniveaus wurden unter Verwendung des Benjamini-Hochberg-Verfahrens zur Kontrolle der Falschentdeckungsrate (FDR) analysiert.

### Ergebnisse:

Die intrazerebralen SAR-Werte waren in den ventralen kortikalen Bereichen ipsilateral der Antenne am höchsten und erreichten Werte von  $0,43 \pm 0,12$  W/kg. Die SAR-Werte im kontralateralen (linken) Kortex fielen auf  $0,14 \pm 0,05$  W/kg. Die gemittelte SAR des gesamten Gehirns betrug  $0,19 \pm 0,12$  W/kg. Alle SAR-Werte liegen unter den Grenzwerten der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) und liegen im nicht-thermischen Bereich.

5G-exponierte Mäuse zeigten keine Hyperaktivität oder abnorme Ängstlichkeit, und ihr Niveau der Erkundung der OF/Objekte war ähnlich wie bei den pseudoexponierten Mäusen. Darüber hinaus waren das Langzeit-Objekterkennungs-gedächtnis und das Langzeitgedächtnis für die räumliche Position von Objekten durch die 27-stündige chronische 5G-Exposition nicht beeinträchtigt. Bei den PSD-exponierten Tieren waren die Transkriptom-Profile im rechten und linken Kortex erwartungsgemäß fast identisch. Signifikante Unterschiede im Niveau der Transkripte ( $FC > 1,2$ , FDR-bereinigtes  $p < 0,05$ ) zwischen dem rechten und linken Kortex in pseudoexponierten Mäusen beschränkten sich auf fünf Gene von insgesamt 12.423 Genen, deren Expression in diesen Hirnregionen nachgewiesen werden konnte. Ein Vergleich von 5G-exponierten und PSD-exponierten Tieren zeigte signifikante Gen-Modulationen, die durch das 5G-3,5 GHz-Signal ausgelöst wurden. Im rechten Kortex beschränkten sich die Veränderungen des Expressionsniveaus



(FC > 1,2, FDR-bereinigtes  $p < 0,05$ ) auf 77 Gene, d. h. auf weniger als 0,7% der exprimierten Gene in dieser Region. Diese differenziell exprimierten Gene (DEGs) umfassten 40 hochregulierte und 37 herunterregulierte Gene als Reaktion auf die chronische 5G-Exposition. Im linken Kortex war die Gesamtzahl der DEGs etwas höher (84 Gene), trotz eines niedrigeren SAR-Wertes im Vergleich zum rechten Kortex. Diese 84 DEGs unterteilten sich in 30 hochregulierte Gene und 54 herunterregulierte Gene als Reaktion auf die 5G-Exposition. Die Identität der DEGs unterschied sich deutlich zwischen dem rechten und linken Kortex, die nur acht ihrer DEGs gemeinsam hatten, von denen sieben sowohl im rechten als auch im linken Kortex herunterreguliert waren. Beim rechten Kortex waren die signifikanten Anreicherungen der Gen-Onkologie(GO)-Terme hauptsächlich mit dem mitochondrialen oxidativen Phosphorylierungssystem (OXPHOS) verbunden. Das mitochondriale (mt-)Genom enthält 13 Gene, die für Proteinuntereinheiten der ATP-produzierenden OXPHOS kodieren. Zehn dieser mt-Gene wurden bei der Exposition mit dem 5G-Signal hochreguliert. Diese Gene kodieren zentrale Untereinheiten der Enzymkomplexe I, III, IV und V der OXPHOS, die in die innere Mitochondrienmembran eingebettet oder dort verankert sind. Darüber hinaus kodierten im rechten und linken Kortex 9 bzw. 11 DEGs für Komponenten von glutamatergen Synapsen.

### Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen keine signifikante Auswirkung des 5G-Signals auf die Fortbewegung, das Angstniveau oder das Erinnerungsvermögen, aber sie offenbaren biologische Reaktionen, genauer gesagt, Modulationen der Genexpression in der Großhirnrinde. Aufgrund der asymmetrischen Exposition des Kopfes verglichen die Autoren die Gen-Expression im rechten und linken Kortex, die unterschiedlich stark dem 5G-3,5 GHz-Signal ausgesetzt waren. Sie beobachteten, dass eine dreifache Abnahme des mittleren SAR-Wertes mit deut-

lichen Veränderungen in der Identität der DEGs verbunden war, ohne dass sich die Anzahl der reagierenden Gene verringerte. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass das Ausmaß der Genreaktion nicht kontinuierlich mit der Höhe der im Gewebe absorbierten Energie zunimmt, wenn die SAR-Werte zwischen 0,1 und 0,5 W/kg liegen. Trotz der deutlichen Unterschiede in den Genidentitäten wiesen die DEG-Profile im rechten und linken Kortex eine signifikante Anreicherung von Genen auf, die mit glutamatergen Synapsen zusammenhängen, die exzitatorische Neurotransmission zwischen dem Hippocampus und kortikalen Regionen vermitteln. Zahlreiche Studien haben die Fähigkeit von RF-EMF untersucht, die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) und den oxidativen Stress im Gewebe zu fördern. In Übereinstimmung mit der Hypothese, dass ein 5G-moduliertes 3,5 GHz-Signal die ROS-Produktion fördern könnte, zeigt diese Studie, dass eine 5G-Exposition die Expression von mt-Genen erhöht, die für Untereinheiten von vier der fünf OXPHOS-Protein-Komplexe kodieren, einschließlich der ROS-produzierenden Komplexe I und III. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die 5G-Exposition über einen Zeitraum von sechs Wochen die Expression einer begrenzten Anzahl von Genen signifikant verändert, was sich möglicherweise auf glutamaterge Synapsen und die mitochondriale Funktion auswirken kann.

### Anmerkung der Redaktion:

Ebenso wie die andere hier besprochene französische Studie (Dahon et al. 2025), ist diese Studie hervorzuheben durch optimale Durchführung und Anwendung neuester Verfahren. Die Studie verwendete zudem ein „echtes“ 5G-Signal. Wie die Autoren selbst angeben, muss weitere Forschung jedoch noch klären, ob und wie schnell sich die beobachteten Veränderungen im Transkriptom aufs Proteom übertragen, d.h. ab wann beobachtbare Veränderungen der glutamatergen Neurotransmission und Mitochondrienfunktion nach 5G-Bestrahlung auftreten. (AT)

**Alle SAR-Werte liegen unter den Grenzwerten der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) und liegen im nicht-thermischen Bereich.**



### Beeinflusst Hochfrequenz Wärmeregulation?

## 5G-Mobilfunk reduziert die Expression von PRDM16 und C/EBP $\beta$ mRNA, zwei wichtige Biomarker für die Bildung braunen Fettgewebes

Seewooruttun C, Bouguila B, Corona A, Delanaud S, Bodin R, Bach V, Desaillood R, Pelletier A (2025). 5G Radiofrequency Exposure Reduces PRDM16 and C/EBP  $\beta$  mRNA Expression, Two Key Biomarkers for Brown Adipogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(6), 2792. <https://doi.org/10.3390/ijms26062792>

Während 5G-Technologie im Hinblick auf Geschwindigkeit entscheidende Vorteile für den Endnutzer bietet, geben mögliche gesundheitsschädigende Wirkungen weiterhin Anlass zu Sorge. Braunes Fettgewebe (BFG) spielt eine zentrale Rolle bei der Wärmegeneration von Säugetieren, ist bei Kindern verstärkt ausgebildet und nimmt mit zunehmendem Alter tendenziell ab. Gleichzeitig stellen Kinder gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) eine besonders anfällige Gruppe dar, da sie eine höhere spezifische Absorptionsrate besitzen als Erwachsene. Frühere Tierversuche haben gezeigt, dass Hochfrequenzbefeldung niedriger Intensität imstande war, eine Kältereaktion auszulösen, darunter Vasokonstriktion und veränderte Noradrenalin Spiegel. Die UCP1-abhängige Wärmegeneration und die Vermehrung braunen Fettgewebes (Hyperplasie) sind zwei grundlegende Mechanismen, die als Reaktion auf Kälte ausgelöst werden. Die vorliegende Studie untersucht den Einfluss von 2G- und 5G-Befeldung auf Schlüsselgene der BFG-Thermogenese und -Adipogenese in jugendlichen und jungen erwachsenen Ratten. Dabei sollen alters- und befeldungsdauerabhängige Wirkungen aufgeklärt und mögliche Risiken von Mobilfunk für die Gesundheit des Stoffwechsels identifiziert werden.

### Studiendesign und Durchführung:

Insgesamt wurden 60 männliche Wistar-Ratten im Alter von 3 Wochen (jugendlich) oder 8 Wochen (jung adult) in drei Gruppen unterteilt: Kontrolle (Scheinfeldung), 2G-Befeldung (900 MHz) und 5G-Befeldung (3,5 GHz). Jede Gruppe umfasste 5 Tiere ( $n = 5$ ) pro Alter und Befeldungsdauer (1 oder 2 Wochen). Die Tiere wurden zweimal täglich für 1 h mit einer Feldstärke von 1,5 V/m befeldet. Dies resultierte in einem Ganzkörper-SAR-Wert von 0,07 mW/kg für 5G- und 0,24 mW/kg für 2G-Befeldung. Nach der Befeldungsperiode wurde den Versuchstieren braunes Fettgewebe entnommen und die Genexpression (mRNA-Ebene) mittels quantitativer PCR untersucht. Dabei wurden Gene analysiert, welche entweder mit Wärmegeneration (UCP1, UCP3, PGC1 $\alpha$ , PPAR $\alpha$ , PPAR $\gamma$ , Cidea, ADR $\beta$ 3, S100b) oder der Bildung

(Adipogenese) des BFG (PRDM16, C/EBP  $\beta$ , C/EBP  $\alpha$ , Zfp423) in Verbindung stehen.

### Ergebnisse:

Die 5G-Befeldung führte alters- und dauerunabhängig zu einer signifikanten Verminderung der mRNA-Spiegel der Adipogenese-Marker PRDM16 (49 %), C/EBP  $\beta$  (32 %) und Zfp423 (30 %). Des Weiteren wurde eine altersabhängige Verminderung des Thermogenesemarkers PPAR $\alpha$  nach 2G-Befeldung bei jungen adulten, nicht jedoch jugendlichen Tieren beobachtet. Der Thermogenesemarkers ADR $\beta$ 3 war nach 2G- und 5G-Befeldung in Abhängigkeit der Befeldungsdauer erhöht: Jugendliche Ratten zeigten lediglich bei 1-wöchiger Befeldungsdauer eine signifikante Zunahme des mRNA-Spiegels.

### Schlussfolgerungen:

Die Wissenschaftler folgern aus Ihren Ergebnissen, dass eine 5G-Befeldung die Differenzierung und Entwicklung brauner Fettzellen durch eine Herunterregulierung von PRDM16, C/EBP  $\beta$  und Zfp423 beeinträchtigen könnte. Dies könne zu einer Verringerung der Wärmeproduktion des BFG, einhergehend mit einem Kälteempfinden führen. Der zentrale Signalweg der UCP1-Thermogenese hingegen werde durch Hochfrequenz nicht beeinflusst. Die Veränderungen von PPAR $\alpha$  und ADR $\beta$ 3 könnten auf eine dauer- bzw. altersspezifische Wirkung der Hochfrequenz auf das BFG hinweisen.

### Anmerkungen der Redaktion:

Die äußerst geringen Feldstärken bzw. resultierenden SAR-Werte, bei denen hier nicht-thermischen Wirkungen auf die Wärmeregulation der Ratten dokumentiert werden, sind besorgniserregend. Die ICNIRP-Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung liegen bei 0,08 W/kg im Vergleich zu den anliegenden 0,07 mW/kg für die Ratten bei der 5G-Befeldung. Da den genutzten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern eine Frequenzmodulation fehlt, könnte bei den 5G-Feldern realer Kommunikationsgeräte von einer stärkeren biologischen Wirkung ausgegangen werden (Lai & Levitt, 2022) we review the literature on three important exposure metrics that are inadequately represented in most major radiofrequency radiation (RFR). Die Autoren selber nennen als Schwachpunkte ihrer Studie die eher geringe Stichprobengröße ( $n = 5$ ) und fehlende Proteomik-Daten. Veränderte mRNA-Spiegel müssen nicht zwangsläufig bedeuten, dass auch die Protein-Spiegel modifiziert sind. Paradoxerweise könnten nicht-thermische HF-EMF niedriger Intensität in die Thermoregulation von Säugetieren eingreifen. (RH)

Lai H, Levitt BB. (2022). The roles of intensity, exposure duration, and modulation on the biological effects of radiofrequency radiation and exposure guidelines. In *Electromagnetic Biology and Medicine* (Vol. 41, Issue 2, pp. 230–255). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15368378.2022.2065683>



## Oxidativer Stress bei nicht-thermischen Feldstärken Eine neuartige Methode zur Erzielung von Präzision und Reproduzierbarkeit in einem 1,8 GHz Hochfrequenz-Expositionssystem, das intrazelluläre ROS als Funktion der Signalamplitude in menschlichen Zellkulturen moduliert

Dahon C, Aguida B, Lebon Y, Le Guen P, Dangremont A, Meyer O, Citerne JM, Pooam M, Raad H, Thoradit T, Jourdan N (2025). A Novel Method for Achieving Precision and Reproducibility in a 1.8 GHz Radiofrequency Exposure System That Modulates Intracellular ROS as a Function of Signal Amplitude in Human Cell Cultures. *Bioengineering*. 2025 Mar 4;12(3):257. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12030257>

Bislang wird oft kritisiert, dass Studien über elektromagnetische Felder (EMF) die Wirkungen bei sehr niedrigen Feldstärken finden entweder fehlerhaft sind (da es noch keinen völlig verstandenen und plausiblen Wirkmechanismus gibt) oder zumindest zweifelhaft, da nicht genügend Vorkehrungen genommen wurden um thermische Wirkungen, auszuschließen. Eine neue Studie von Forschern der französischen Sorbonne-Universität hat nun zumindest das Argument der mangelnden Temperaturkontrolle überzeugend widerlegt. Derzeit gilt die Hochfrequenz(HF)-Exposition im Allgemeinen als sicher. Die Richtlinien für HF-Expositionsgrenzwerte befassen sich jedoch nur mit wärmebedingten Problemen, während es immer deutlicher wird, dass signifikante physiologische Wirkungen bei sehr niedrigen, sogenannten nicht-thermischen HF-Expositionen auftreten können. Jüngste Studien haben gezeigt, dass eine Hauptwirkung von HF-Emissionen die Induktion von zellulärem oxidativem Stress ist, der durch eine erhöhte Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) innerhalb von Minuten nach der Exposition gemessen wird. Dieser Befund ist besonders vielversprechend, da dies die vielfältigen physiologischen Folgen erklären könnte, die als Reaktion auf HF-Exposition berichtet wurden, einschließlich der Auswirkungen auf die Genexpression, die DNA-Reparatur, kognitive und Verhaltensänderungen, Krebsrisiken und Auswirkungen auf die Fortpflanzung und Fruchtbarkeit. Dennoch gibt es in der Literatur viele widersprüchliche Berichte, und diese Schlussfolgerungen bleiben umstritten. Infolgedessen sind die Klärung kontroverser Bereiche und die Erzielung von Ergebnissen mit angemessener Präzision und Reproduzierbarkeit nach wie vor große Hindernisse für Fortschritte in diesem Bereich. Die Herausforderung bei den traditionellen HF-Expositionssystemen war die Aufrechterhaltung geeigneter Inkubationsbedingungen für die Zellkulturen (Temperatur, CO<sub>2</sub> und Luftfeuchtigkeit) während relativ langer Versuchsabläufe und die Gewährleistung einer angemessenen kont-

rollierten Scheinbefeldung. Ein weiteres Problem bestand darin, dass Kontaminationen durch externe Signale nicht konsequent eliminiert werden konnten. In der aktuellen Studie überwinden die Wissenschaftler viele der Einschränkungen früherer Forschung, indem sie die Zellkulturen nur einer einzigen 15-minütigen Exposition mit einer 1,8-GHz-Trägerwelle aussetzten. Die Expositionsapparatur ist so klein, dass sie leicht transportiert und in einer Absorberkammer (EMF-abgeschirmter Raum) aufgestellt werden kann. Es ist einfach zu konstruieren, zu betreiben und numerisch zu modellieren und kann daher ohne weiteres in anderen Labors nachgebaut werden.

### Studiendesign und Durchführung:

Menschliche embryonale Nierenzellen HEK 293 wurden in einem CO<sub>2</sub>-Inkubator bei 37 °C kultiviert. Die Test- und Kontroll-Proben wurden für 15 Minuten in die RF-Expositions-Box gelegt. Nach der Exposition wurden sowohl die Schein- als auch die Testzellkulturen für weitere 2 Stunden und 45 Minuten in den regulären Inkubator zurückgebracht, um die Reaktion der Genexpression zu ermöglichen. Primer für RF-Expositions-regulierte Gene, die zuvor identifiziert wurden (K1AA, KRT79, DDX50, RPS16P5, GPX1 und SOD2), wurden wie in früheren Studien beschrieben verwendet. Das GAPDH-Gen wurde als Referenzgen verwendet. Bezüglich des RF-EMF-Expositionssystems: Die Petrischale mit den zu bestrahlenden Zellkulturen wurde in die RF-Expositionsbox gestellt, die wiederum in einer Absorberkammer untergebracht ist. Dadurch wurde die Probe von jeglicher externer elektromagnetischer Strahlung isoliert. Ein Temperatursensor im Inneren der Box regelte die Zirkulation von heißem Wasser, was für eine stabile Innentemperatur von 37 °C während des Experiments sorgte. Das verwendete Signal war eine reine Sinuswelle, gespeist von einem Anritsu Mikrowellengenerator, und wurde über eine Patch-Antenne abgestrahlt, deren Parameter genau modelliert wurden, um eine gleichmäßige Bestrahlung der Zellkulturen zu garantieren. Das elektrische Feld wurde mit einem Anritsu Spektrumanalysator ermittelt.

### Ergebnisse:

Ziel dieses Experiments war es, genaue und reproduzierbare Informationen darüber zu erhalten, wie die HF-Signalamplitude die zelluläre Genexpression in menschlichen Zellkulturen moduliert. Es wurde eine Reihe von Genen identifiziert, die schnell und spezifisch auf vorübergehende Veränderungen der zellulären ROS reagieren, insbesondere wenn sie durch statische und gepulste elektromagnetische Felder induziert werden.

Die Leistungsdichte, die die Zellen erreichte, lag zwischen 11 mW/m<sup>2</sup> und 0,66 µW/m<sup>2</sup>, sehr niedrige, nicht-thermische Werte, die denen von alltäglichen Smartphones oder WiFi in Entfernungen zwischen 30 cm und 50 m ähneln (Anmerkung der Red.). Die HF-Exposition führte zu einer 2,5-fachen Stimulation der Genexpression des KIAA-Gens bei einer Eingangsleistung P<sub>gene</sub> von +10 dBm (PEMG ~ 3 mW/m<sup>2</sup>, der höchsten verwendeten Amp-

litute). Es gab einen progressiven Rückgang der Genexpression bei niedrigeren HF-Expositions-Amplituden von 0, -10 und -20 dBm (bzw. 300, 30 und 3  $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ), im wesentlichen identisch zur Kontrollbedingung. Bei  $P_{\text{gene}} = -30$  dBm ( $0,66 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ) und wiederum bei  $P_{\text{gene}} = -40$  dBm ( $<0,66 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ) gab es jedoch einen dramatischen Anstieg der Genexpression um das Fünffache bei diesen verschwindend geringen Werten der HF-Amplitude. Diese Experimente wurden dann mit fünf weiteren ROS-empfindlichen und/oder ROS-signalisierenden Genen (KRT79, DDX-50, RPS, GPX-1 und SOD2) wiederholt.

Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Modulation der Genexpression als Reaktion auf die HF-Exposition für die Mehrzahl der analysierten Gene; KRT79 zum Beispiel zeigte eine fast 10-fache Stimulation bei  $P_{\text{gene}} = -10$  dBm ( $\text{PEMG} = 30 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ), während bei  $P_{\text{gene}} = 0$  dBm ( $\text{PEMG} = 300 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ) tatsächlich eine Abnahme der Expression um mehr als das Zweifache zu verzeichnen war. Tatsächlich war die Amplitude der Genexpression in allen Fällen nicht linear zur HF-Signalamplitude und zeigte meist biphasische oder U-förmige Merkmale. Die maximale KIAA-, GPX1- und RPS-Expression wurde bei der niedrigsten getesteten Leistung von -40 dBm erreicht, was weniger als  $0,66 \mu\text{W}/\text{m}^2$  entspricht (Messwert außerhalb der Skala).

### Schlussfolgerungen:

Die Autoren listen wichtige Merkmale, die die Qualität der vorliegenden Studie gewährleisten: Erstens wird durch die Verwendung einer Absorberkammer die Möglichkeit unbekannter Störsignale, erheblich reduziert. Zweitens wird durch eine Kombination aus numerischer Simulation und direkten Messungen die Präzision der Expositionsbedingungen erheblich gesteigert. Drittens: Im Gegensatz zu den meisten HF-Expositionsprotokollen wird in dieser Studie ein homogenes Zellkultursystem verwendet, das nur einer einzigen, kurzen, einfachen Trägerwellenfrequenz ausgesetzt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die physiologischen Messwerte (Genexpression) in direktem Zusammenhang mit den durch das HF-Signal ausgelösten zellulären Reaktionen stehen. Dieses System entgeht damit der Unsicherheit, die durch die Messung indirekter Auswirkungen der HF-Exposition (wie z. B. das Auftreten von Krebs nach mehreren Monaten) entsteht, die durch viele andere physiologische und umweltbedingte Einflüsse in unkontrollierbarer Weise moduliert werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verbesserungen dieses Aufbaus ein relativ kostengünstiges Mittel darstellen, um Ergebnisse zu erzielen, die gut charakterisiert, zuverlässig und frei von experimentellen Artefakten sind. Darüber hinaus wurden die thermischen Schwankungen während der Exposition gemessen und aufgezeichnet, und es gab zu keinem Zeitpunkt einen Temperaturanstieg während des gesamten Versuchsverlaufs.

### „Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Modulation der Genexpression als Reaktion auf die HF-Exposition für die Mehrzahl der analysierten Gene.“

Ein wichtiges biologisches Ergebnis dieser Studie ist, dass lebende Zellen empfindlich auf HF-EMF-Exposition reagieren bei Signalstärken, die weit unter den derzeitigen Sicherheitsgrenzwerten liegen. Diese Effekte treten außerdem innerhalb des normalen Emissionsbereichs von Mobiltelefonen und Wi-Fi-Antennen auf, denen man täglich ausgesetzt ist. Die Grenzwerte der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) sind um mehrere Größenordnungen höher als die in der vorliegenden Studie verwendeten Leistungsdichten und wurden weitgehend auf der Grundlage thermischer Überlegungen festgelegt, die bei diesen Energien nicht relevant sind. Um jegliche Verwirrung hinsichtlich der Auswirkungen dieser Ergebnisse auf die menschliche Gesundheit zu vermeiden, betonen die Autoren, dass die vorliegenden Daten nicht als Beweis dafür angesehen werden können, dass HF-Signale in diesem niedrigen Bereich gefährlich sind. In der Tat gebe es derzeit keine schlüssigen Beweise dafür, dass HF-Exposition zu irgendeiner Art von Krankheit führt. Darüber hinaus induzieren viele Umweltstressoren wie Umweltverschmutzung, Zigarettenrauch und starkes Sonnenlicht einen Anstieg der intrazellulären reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) in menschlichen Zellen. All diesen „normalen“ Stressquellen, einschließlich der wahrscheinlichen Auswirkungen der täglichen HF-Exposition, wird durch effiziente Antioxidationsmechanismen entgegengewirkt. Nichtsdestotrotz ist es offensichtlich, dass HF-Signale, selbst mit erstaunlich schwachen Leistungen, physiologisch wirksam sind (Die französischen Forscher drücken sich hier zuerst vorsichtig aus, dass die gefundenen Wirkungen auf oxidativen Stress nicht direkt als gesundheitsschädigend gedeutet werden könnten, da dies noch nicht untersucht wurde, und vielleicht auch, um nicht durch unangenehme Aussagen in ein negatives Rampenlicht gestellt zu werden. Sie betonen aber, dass auch sehr schwache HF-Exposition physiologisch wirksam sei, Anm. der Redaktion.)

Der primäre physikalische Mechanismus, wie diese HF-Signale mit zellulären Rezeptoren interagieren, sollte in Zukunft weiter untersucht werden. Hormesis ist ein Dosis-Wirkungs-Phänomen, das durch eine biphasische Beziehung gekennzeichnet ist, bei der niedrige Dosen einer Substanz eine stimulierende oder nützliche Wirkung hervorrufen, während höhere Dosen zu hemmenden oder toxischen Resultaten führen. Die Hormesis ist besonders gut für die Signalübertragung ROS dokumentiert, bei der niedrige ROS-Konzentrationen adaptive und nützliche zelluläre Reaktionen stimulieren können, während übermäßige ROS-Konzentrationen oxidativen Stress und Zellschäden verursachen. Die biphasischen Reaktionscharakteristika auf HF sind ein Hinweis darauf, dass HF wahrscheinlich mit biologischen Rezeptoren interagiert, möglicherweise mit Enzymen, die Redoxreaktionen katalysieren. Herkömmliche Modelle beruhen auf der Ermittlung eines NOAEL-Wertes (no observed adverse effect

level) und gehen davon aus, dass alle Dosen unterhalb dieses Schwellenwertes ohne Wirkung sind. Die Belege für hormetische Reaktionen zeigen jedoch, dass selbst wenn eine HF-Exposition bei bestimmten Amplituden keine messbaren Wirkungen hervorruft, dies keineswegs ausschließt, dass Expositionen bei niedrigeren Dosen physiologisch schädliche Wirkungen haben können. Daher ist eine Neubewertung der derzeitigen Praktiken zur Bewertung der HF-Exposition erforderlich, um das Potenzial für eine Stimulation bei niedrigen Dosen und die nichtlineare Natur der Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu berücksichtigen. Diese zellulären Reaktionen treten bei HF-Signalamplituden auf, die um mehrere Größenordnungen unter denen liegen, die zur Erzielung thermischer Wirkungen erforderlich sind, und liegen im Bereich des alltäglichen Gebrauchs von Mobiltelefonen und WLAN.

#### **Anmerkung der Redaktion:**

Diese neue Studie zeigt erstmalig, durch Offenlegen und Vereinfachen aller Vorgänge und Prozesse, mit hoher methodischer Finesse, wie EMF-Studien im Optimalfall durchgeführt werden sollten. Der beschriebene Weg kann einfach von anderen Forschungsgruppen wiederverwendet werden, was längerfristig zu mehr Konsistenz und Reproduzierbarkeit in diesem immer noch neuen und unterentwickelten Forschungsfeld führen könnte. Das beeindruckendste Resultat der Studie sind jedoch die wiederholt gefundenen Wirkungen auf die Genexpression bei sehr niedrigen Feldstärken ( $< 1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ), die sogar zum Teil unter den BioEMF-Empfehlungen liegen. Es bleibt weiterhin spannend, aber auch mysteriös, genau wie diese beobachteten nicht-thermischen Effekte zustande kommen, und sollte gründlich erforscht werden. (AT)



#### **Mechanismen von EMF**

### **Der Radikalpaar-Mechanismus kann die Auswirkungen von Telekommunikationsfrequenzen auf reaktive Sauerstoffspezies nicht erklären**

Talbi O, Zadeh-Haghighi H, Simon C. The Radical Pair Mechanism Cannot Explain Telecommunication Frequency Effects on Reactive Oxygen Species (2025). bioRxiv. 2024 Jun 25:2024-06. <https://doi.org/10.3389/frqst.2025.1544473>

Reaktive Sauerstoffspezies (ROS) spielen bei verschiedenen physiologischen Prozessen eine wichtige Rolle. Eine übermäßige Anhäufung von ROS kann oxidativen Stress auslösen, der erhebliche Schäden an Lipiden, Proteinen und DNA verursacht. Dies kann die Zellfunktion beeinträchtigen und wird mit dem Auftreten verschiedener Krankheiten in Verbindung gebracht, darunter Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und neurodegenerative Erkrankungen. Es ist bekannt, dass schwache Magnetfelder chemische Reaktionen beeinflussen können. In zahlreichen Studien wurden die Auswirkungen statischer Magnetfelder (SMF) auf die ROS-Produktion dokumentiert, was ihre biologische Bedeutung unterstreicht. Der Radikalpaar-Mechanismus (RPM) kann die Auswirkungen statischer Magnetfelder auf chemische Reaktionen erklären, die ihren Ursprung in der Spin-Chemie haben, wobei die Magnetorezeption bei Vögeln ein bemerkenswertes Beispiel ist. Das Radikalpaar-Modell ist ein bekanntes Modell zur Erklärung der biologischen Wirkungen von Magnetfeldern oder hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung (RF-EMR). Es basiert auf dem Zeeman-Effekt von Magnetfeldern auf Spin-Zustände. In einem Reaktionssystem, das Radikalpaare im Singulett- und Triplett-Zustand enthält, verschiebt ein externes Magnetfeld das Energieniveau der Triplett-Zustände, verändert das Gleichgewicht der Singulett-Triplett-Umwandlung und verändert die Konzentrationen der verschiedenen Radikale und ihrer Reaktionsprodukte. Das Modell der Radikalpaare ist auf biochemische Reaktionen anwendbar, wie am Beispiel des Photorezeptors Cryptochrom zu sehen ist.

Die Dynamik der Radikalpaare wird in hohem Maße durch Zeeman- und Hyperfeinstruktur-Wechselwirkungen beeinflusst. Durch die Zeeman-Wechselwirkung werden die Elektronenspins auf ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet, wodurch sich die Energiezustände ändern und die Reaktionswege beeinflusst werden. Ein häufig erwähnter magnetosensitiver Photorezeptor, Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD), ist mit Cryptochrom (Cry) verbunden. Es wird angenommen, dass das FAD durch ein blaues Photon angeregt ( $\text{FAD}/\text{FAD}^*$ ) und anschließend protoniert wird ( $\text{FAD}^*/(\text{FADH}^+)^*$ ). Dann finden nacheinander drei Elektronentransfers statt, die magnetosensitive Singulett- und Triplett-Radikalpaare erzeugen. Ob das FAD-bindende Cryptochrom der molekula-

re Magnetkompass ist, ist jedoch noch umstritten. Ein anderes Modell geht davon aus, dass der Proteinkomplex (MagR)/Cry der magnetische Rezeptor ist, weil die Proteinkristalle eine starke intrinsische magnetische Polarität aufweisen und sich synchron mit dem äußeren Magnetfeld drehen. Das Modell der radikalen Paare besagt, dass ein äußeres statisches Magnetfeld die Hyperfeinaufspaltung der Triplett-Zustände verursacht und dass die magnetische Empfindlichkeit der entsprechenden biochemischen Reaktionen durch EM-Strahlung bei Larmor-Frequenz beeinflusst werden kann, d. h. durch Photonen, deren Energie genau den Unterschieden zwischen den Energieniveaus der Singulett- und Triplett-Zustände entspricht. Es gibt experimentelle Beweise, die das Modell der radikalen Paare unterstützen.

Die Flugrichtung navigierender Vögel wurde durch EMR mit Larmor-Frequenz unterbrochen. Und die biochemischen Reaktionen, an denen die Triplett- (O<sub>2</sub>-) und Singulett-Zustände (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) der ROS in Zellen beteiligt sind, werden durch eine 7-MHz-EMR in Gegenwart eines statischen Magnetfeldes von 45 mT beeinflusst (Liu et al., 2024).

### Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren erläutern die verschiedenen Schritte, mit denen sie die magnetische Feldstärke  $H$  aus der spezifischen Absorptionsrate (SAR) durch das elektrische Feld  $E$  und verschiedene Konstanten ableiten. Unter Anwendung der erörterten Prinzipien untersuchen sie, wie diese Magnetfelder die Quantenzustände und Reaktionsausbeuten von Radikalpaaren beeinflussen, indem sie die Spin-Hamiltonsche Funktion für ein typisches Radikalpaarsystem in Gegenwart eines statischen Magnetfeldes verwenden. Die Gleichung wird aktualisiert, um den RPM-Effekt von oszillierenden Magnetfeldern zu berechnen, was eine zeitabhängige Dynamik einführt.

### Ergebnisse:

Die anschließende Computermodellierung ermöglichte, daraus Frequenzen abzuleiten, die Spitzenresonanzen ergeben. Eine dieser Resonanzspitzen entspricht der Larmor-Frequenz der Elektronen. Dieser Resonanzeffekt ist besonders ausgeprägt, wenn die statischen und oszillierenden Magnetfelder senkrecht zueinander stehen, was mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmt. Außerdem wurde ein weiterer Resonanzeffekt bei einer höheren Frequenz von etwa 22,5 MHz festgestellt. Diese Resonanz entspricht den Übergängen zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Energieniveau des Hyperfein-Spin-Hamiltonians. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Maximalfrequenz bei der eine Wirkung beobachtet wurde, deutlich niedriger ist als die Telekommunikationsfrequenzen, die normalerweise über 800 MHz liegen.

### Schlussfolgerungen:

In Übereinstimmung mit einfachen Resonanzargumenten zeigt diese Studie die Grenzen des Radikalpaar-Mechanismus bei der Erklärung der beobachteten Wirkungen von Hochfrequenzfeldern auf, insbesondere im Telekommunikationsbereich, wie z. B. bei 800 MHz und höher. Während der RPM-Mechanismus die Wirkungen statischer Magnetfelder auf ROS gut erklären kann, ist er nicht in der Lage, die Wirkungen von Radiofrequenzstrahlung auf reaktive Sauerstoffspezies zu erklären. Mehrere Studien haben Verstärkungswege beschrieben, die ansonsten subtile RPM-basierte Effekte verstärken könnten. Diese Studien deuten darauf hin, dass die Verstärkungsfaktoren unter günstigen biochemischen Bedingungen bis zu einem Faktor Hundert reichen könnten.

Selbst bei einem derartigen Verstärkungsgrad bleibt der vorhergesagte Effekt äußerst gering. In Abwesenheit von Resonanz schätzen die hier vorliegenden Simulationen den RPM-Effekt auf  $6,11 \times 10^{-4} \%$ , und selbst bei Anwendung des größten plausiblen Verstärkungsfaktors würde der Effekt immer noch nur  $6,11 \times 10^{-4} \%$  erreichen. Dies deutet darauf hin, dass RPM-basierte Vorgänge nicht für die beobachteten Effekte bei Telekommunikationsfrequenzen verantwortlich sind. Angesichts dieser Einschränkungen scheint es plausibel, dass diese Effekte eher auf die elektrische Komponente des elektromagnetischen Feldes von Telekommunikationsgeräten zurückzuführen sein könnten. Elektrische Felder interagieren direkt mit geladenen zellulären Strukturen, insbesondere mit spannungsgesteuerten Ionenkanälen und membran gebundenen Enzymen, was einen nicht-magnetischen Weg zur ROS-Modulation eröffnet. HF-induzierte Störungen der Ionenkanäle können das Redox-Gleichgewicht stören und den oxidativen Stress verstärken, aber hier ist weitere Forschung erforderlich, um die Mechanismen vollständig zu verstehen.

### Anmerkung der Redaktion:

Die vorliegende theoretische und Simulationsstudie baut auf ältere Arbeiten auf und entwickelt das theoretische Verständnis der Radikalpaar-Biologie einen Schritt weiter (Barnes & Greenebaum, 2015). Weitere Forschung ist notwendig, um diese Resultate zu überprüfen und alternative Erklärungsansätze für die robust beobachteten aber bislang nicht gut verstandenen Wirkungen von hochfrequenter EM-Strahlung zu entwickeln. Zumindest scheint der RPM beteiligt an den biologischen Wirkungen von statischen und niederfrequenten Magnetfeldern (AT).

Liu, L., Huang, B., Lu, Y., Zhao, Y., Tang, X., & Shi, Y. (2024). Interactions between electromagnetic radiation and biological systems. *iScience*, 27(3), 109201. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109201>

Barnes FS, Greenebaum B. The effects of weak magnetic fields on radical pairs. *Bioelectromagnetics*. 2015 Jan;36(1):45-54. <https://doi.org/10.1002/bem.21883>

**„Der Radikalpaar-Mechanismus kann die Wirkungen von Hochfrequenzfeldern auf reaktive Sauerstoffspezies, insbesondere im Telekommunikationsbereich, nicht erklären.“**





### Kritische Betrachtungen

## Kritische Analyse der systematischen Überprüfung von 2024 der Weltgesundheitsorganisation (WHO) über hochfrequente Strahlungsexposition und Krebsrisiken

Hardell L, Nilsson M. A Critical Analysis of the World Health Organization (WHO) Systematic Review 2024 on Radiofrequency Radiation Exposure and Cancer Risks (2025). *Journal of Cancer Science and Clinical Therapeutics*. 2025;9:09-26. <https://doi.org/10.26502/jcsct.5079261>

Hochfrequente Strahlung wurde 2011 von der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) der WHO als mögliches Karzinogen für den Menschen eingestuft. Derzeit führt die WHO eine systematische Überprüfung von Humanstudien zu den Krebsrisiken durch. 2024 wurden zwei Reviews über hochfrequente elektromagnetische Strahlung (RF-EMF) und Krebsrisiken veröffentlicht. Das erste Review wurde von der WHO in Auftrag gegeben und von Karipidis et al., 2024 veröffentlicht. Die zweite Studie, Moon et al., 2024, wurde von Wissenschaftlern in Korea veröffentlicht, und die Schlussfolgerungen zum Hirntumorrisiko standen in völligem Widerspruch zu denen des Karipidis-Reviews. Der Karipidis-Bericht argumentierte mit „mäßiger Sicherheit“, dass die Nutzung von Mobiltelefonen „wahrscheinlich nicht das Risiko von Gliomen, Meningiomen, Akustikusneurinomen, Hypophysentumoren und Speicheldrüsentumoren bei Erwachsenen oder von pädiatrischen Hirntumoren erhöht“.

Im Gegensatz dazu kamen Moon et al. zu dem Schluss, dass die verfügbaren Studien in ihrer Gesamtheit zeigen, dass die Nutzung von Mobiltelefonen das Risiko von Hirntumoren erhöht. Ein Grund für die widersprüchlichen Schlussfolgerungen, die auf denselben wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen, könnte darin liegen, dass Moon et al. keine Interessenkonflikte angegeben haben, während mehrere Autoren des Karipidis-Reviews Interessenkonflikte haben, da sie direkt mit der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) oder anderen Lobbys der Mobilfunkindustrie verbunden sind. In einer Korrespondenz der Internationalen Kommission über die biologischen Auswirkungen elektromagnetischer Felder (ICBE-EMF, Frank et al., 2025) wurden mehrere Probleme in der Studie von Karipidis et al. über Krebs aufgezeigt, wie z. B.: die Zugrundelegung von Schlussfolgerungen aus Studien mit Konstruktionsfehlern, die Verwendung von HF-Strahlungsexpositionskategorien, die das derzeitige Ausmaß der Exposition nicht widerspiegeln, die Auslassung von Studien, die ein erhöhtes Auftreten von Hirntumoren belegen, die Verwendung von Studien mit kurzer Latenzzeit und die Nichtbeachtung von Standardempfehlungen für die Zusammenfassung von Ergebnissen aus Primärstudien. In der aktuellen Studie gehen Har-

dell und Nilsson detailliert auf einige der eklatantesten wissenschaftlichen Fehler in dem WHO-Bericht von Karipidis et al. ein.

Probleme mit der Methodik und der wissenschaftlichen Zuverlässigkeit des in der Studie von Karipidis et al. verwendeten Ansatzes:

Ignorieren der Studien mit der höchsten kumulativen Anrufzeitexposition, die ein erhöhtes Risiko für Hirntumore zeigen. Karipidis et al. scheinen den statistisch nicht signifikanten Ergebnissen von Studien mit geringer Exposition zu viel Gewicht beizumessen, anstatt Studien, die statistisch signifikant erhöhte Odds Ratios (ORs) in den am stärksten exponierten Gruppen fanden. Außerdem behaupten sie, dass es kein erhöhtes Risiko gebe, und stützen sich dabei auf einen Datensatz von Studien, der Ergebnisse enthält, die ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko bei einer kumulativen Anrufzeitexposition von > 896 bis > 1640 Stunden zeigen.

Grundloser Ausschluss von Analysen zur Lateralität, die eindeutige Beweise für ein erhöhtes Hirntumorrisiko bei ipsilateraler Nutzung des Mobiltelefons (auf derselben Seite wie der Hirntumor), einschließlich des schnurlosen Telefons. So wurden die Ergebnisse für den am stärksten exponierten Teil des Gehirns ausgeschlossen. Dieser Schlussfolgerung widerspricht Schüz (Autor einer Kohortenstudie, die Karipidis et al. hoch einschätzten und in ihrer Analyse verwendeten, Anm. der Redaktion), der einräumt, dass in dem bis dahin größten veröffentlichten Teil der Interphone-Studie „ein beobachtetes erhöhtes OR für die ipsilaterale Nutzung nicht durch ein ähnlich verringertes OR für die kontralaterale Nutzung kompensiert wurde (ORs von 1,39 versus 0,98), zumal dies unter den Fällen mit der längsten Zeit seit der ersten Nutzung gefunden wurde... dies ist, was man unter der Annahme eines kausalen Effekts erwarten würde“.

Einbeziehung schlecht durchgeführter und daher unzuverlässiger Studien als wissenschaftlicher Beweis für ein fehlendes Risiko. Es handelt sich um Kohortenstudien über die Nutzung von Mobiltelefonen, denen ein relativ großes Gewicht beigemessen wurde. Beide Kohorten, insbesondere die dänische Kohorte, leiden unter einer schwerwiegenden Fehlklassifizierung der Exposition und einer unbekanntem tatsächlichen Exposition, die die Ergebnisse dieser Studien in Bezug auf Krebs und andere gesundheitliche Folgen ungültig machen. Die Folgen der Einbeziehung von Studien, die Behandlungs- und Kontrollgruppen falsch definiert oder zugeordnet haben, in eine Meta-Analyse, sind in der Epidemiologie wohlbekannt. „Das Ergebnis wird immer eine Verwässerung sein, und die Effektstärke wird in Richtung des Nullwertes gezogen.“

Es wurden nur fünf Studien einbezogen, die die Exposition durch Sendeantennen oder Basisstationen modellierten, und nur Studien über Krebs bei Kindern, wodurch mehrere Studien ausgeschlossen wurden, die ein erhöhtes Krebsrisiko bei Kindern und Erwachsenen in der Nähe von Sendeantennen und Basisstationen zeigten. Eine der beiden eingeschlossenen Studien zu

Basisstationen berichtete über ein erhöhtes Risiko für alle Neoplasmen bei Kindern mit einer über dem Mittelwert liegenden HF-Exposition durch Mobilfunk-Basisstationen. Karipidis et al. behaupteten jedoch, es gäbe „mit mäßiger Sicherheit“ keinen Hinweis auf ein Leukämierisiko bei Kindern.

Bewertung des Risikos der Verzerrung (RoB). Die Studien wurden auf der Grundlage des Verzerrungspotenzials in drei Gruppen eingeteilt: niedrig, mäßig oder hoch, die offenbar nicht auf einer soliden wissenschaftlichen Bewertung beruhen. Hardell und Nilsson führen einige Beispiele für die Fehlinterpretation und Verzerrung wissenschaftlicher Fakten in der RoB-Bewertung auf. Vergleicht man die Bewertungen mit den tatsächlichen Studien, kommt man zu dem Schluss, dass die Bewertung von Karipidis et al. sehr voreingenommen und eher willkürlich oder unwissenschaftlich ist.

Mehrere Autoren der Karipidis-Gruppe haben Interessenkonflikte in Form von Verbindungen zur ICNIRP. ICNIRP ist die Organisation, die die Expositionsgrenzwerte empfohlen hat, die die meisten Länder der Welt übernommen haben. Die Telekommunikationsindustrie hat ihre Technologie an die ICNIRP-Grenzwerte angepasst. Wenn ein Krebsrisiko durch die Mobilfunktechnologie unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte anerkannt würde, hätte dies wirtschaftliche Folgen für die Branche. Außerdem sind die ICNIRP-Grenzwerte auch für die Einführung neuer Technologien wie 5G durch die Industrie von Bedeutung. Niedrigere Grenzwerte als die der ICNIRP würden die Einführung von 5G erschweren, laut Angaben der Industrie.

### Schlussfolgerungen:

Die Schlussfolgerungen der WHO-Karipidis-Gruppe, dass die Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen oder die Exposition gegenüber HF-Strahlung von Sendern und Basisstationen kein Krebsrisiko darstellt, beruhen auf mehreren Fehlern bei der Interpretation der wissenschaftlichen Ergebnisse, der Auslassung von Fakten, die den Schlussfolgerungen widersprechen, und inhärenten Interessenkonflikten. Außerdem beruhen die

meisten Ergebnisse, auf die die Autoren ihre Schlussfolgerungen stützen, auf sehr niedrigen Expositionswerten, die nicht repräsentativ für die heutige Exposition der Bevölkerung sind, und die Autoren haben Ergebnisse, die auf höchsten Expositions-kategorien beruhen, ausgeschlossen oder ignoriert. Die Schluss-

**Die Schlussfolgerungen der WHO-Karipidis-Gruppe, dass die Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen oder die Exposition gegenüber HF-Strahlung von Sendern und Basisstationen kein Krebsrisiko darstellt, beruhen auf mehreren Fehlern bei der Interpretation der wissenschaftlichen Ergebnisse, der Auslassung von Fakten, die den Schlussfolgerungen widersprechen, und inhärenten Interessenkonflikten.**

folgerungen der Autoren mit verschiedenen Graden von „Sicherheit“, dass HF-EMF-Expositionen keinen Krebs verursachen, sind unwissenschaftlich und in Anbetracht der verfügbaren wissenschaftlichen Beweise nicht gerechtfertigt. Die eindeutigen, aber uneingestanden Interessenkonflikte stellen die gesamte Arbeit von Karipidis et al. in Frage. Bewertungen von Gesundheitsrisiken durch HF-Strahlung sollten von Wissenschaftlern durchgeführt werden, die nicht

mit der ICNIRP oder der Industrie verbunden sind. Direkte oder indirekte Verbindungen zur Industrie können eine objektive und solide wissenschaftliche Bewertung beeinträchtigen. Hardell und Nilsson fordern den Rückzug des Artikels von Karipidis et al. aufgrund des schwerwiegenden wissenschaftlichen Fehlverhaltens mit einer fatal fehlerhaften Bewertung der Krebsrisiken von Hochfrequenzstrahlung. (AT)

Frank, J. W., Moskowitz, J. M., Melnick, R. L., Hardell, L., Philips, A., Héroux, P., & Kelley, E. (2025). The Systematic Review on RF-EMF Exposure and Cancer by Karipidis et al. (2024) has Serious Flaws that Undermine the Validity of the Study's Conclusions. *Environment International*, 195, 109200. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109200>

Karipidis, K., Baaken, D., Loney, T., Blettner, M., Brzozek, C., Elwood, M., Narh, C., Orsini, N., Rösli, M., Paulo, M. S., & Lagorio, S. (2024). The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies – Part I: Most researched outcomes. *Environment International*, 191, 108983. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108983>

Moon, J., Kwon, J., & Mun, Y. (2024). Relationship between radiofrequency-electromagnetic radiation from cellular phones and brain tumor: Meta-analyses using various proxies for RF-EMR exposure-outcome assessment. *Environmental Health*, 23(1), 82. <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01117-8>



## WHO Übersicht zu EMF und Fauna und Flora

# Untersuchung der Auswirkungen von anthropogenen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf Tiere und Pflanzen in der Umwelt: Analyse anhand einer systematischen Karte

Brzozek C, Mate R, Bhatt CR, Loughran S, Wood AW, Karipidis K (2024). Investigating the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: analysis from a systematic map. *International Journal of Environmental Studies*. 2024 Sep 2;81(5):2343-58. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2375861>

Die Entwicklung neuer Technologien und die Verbreitung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF)-emittierenden Geräten hat in Teilen der Öffentlichkeit Besorgnis ausgelöst und wurde von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) als Forschungsbedarf von hoher Priorität eingestuft. Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) hat internationale Richtlinien zum Schutz der menschlichen Gesundheit vor übermäßiger Exposition gegenüber HF-EMF festgelegt. Es gibt jedoch keine speziellen Expositionsrichtlinien zum Schutz von Pflanzen und Tieren. Es wurden eine Reihe von Reviews über die HF-EMF-Exposition verschiedener Pflanzen und Tiere durchgeführt, aber es habe bislang eine detaillierte systematische Suche gefehlt mit klaren Kriterien für den Einschluss bzw. Ausschluss relevanter Studien (so die Autoren). Da es keine aktuelle systematische Zusammenstellung der Forschung zur anthropogenen HF-EMF-Exposition und den Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere gab, versuchten die vorliegenden Autoren, eine systematische Karte zu erstellen (welche 2023 erschienen ist und im EREP 2024/1 besprochen wurde, Karipidis et al., 2023). Über 24.000 Artikel wurden gescreent, um 334 relevante Studien zu finden (237 über Fauna und 97 über Flora). In der systematischen Karte wurden Forschungscluster identifiziert, wobei Vögel und Insekten die am häufigsten untersuchten Tierarten waren und sich die Ergebnisse hauptsächlich auf Fortpflanzung, Entwicklung und Verhalten konzentrierten. Die systematische Karte stellte alle verfügbaren Belege für die Umwelteffekte anthropogener HF-EMF zusammen, analysierte aber nicht die tatsächlichen Auswirkungen der HF-Exposition auf Tiere und Pflanzen in der Umwelt. Diese Studie baut auf die vorher publizierte systematische Karte auf und zielt darauf ab, das Ausmaß der Wirkung von HF-EMF in den verfügbaren Studien zu analysieren und zu untersuchen, wie es mit den verschiedenen Expositionsparametern und der Qualität der Studien zusammenhängt.

### Studiendesign und Durchführung:

Studien, die die Auswirkungen von HF-EMF auf Tiere und

Pflanzen untersuchten, berichteten über ein Spektrum von Wirkungen, das von keiner Wirkung über geringe Wirkungen bis hin zu großen Wirkungen reicht. Daher ist es wichtig, die Verteilung der Effektstärke (ES) über die verschiedenen Studien hinweg zu ermitteln, wobei zu beachten ist, dass  $ES = 0$  keine statistisch signifikante Wirkung bedeutet und  $ES > 0$  eine signifikante Effektstärke ausdrückt, wobei eine größere Zahl einer größeren Wirkung entspricht. Die ES, hier Cohen's d, wurde anhand verschiedener Methoden geschätzt. Für jede Studie wurde auch von zwei Gutachtern eine Qualitätsbewertung („quality score“, QS) vergeben, wobei die endgültige Qualitätsbewertung dem Durchschnitt der beiden Bewertungen entsprach. Für experimentelle Studien wurde die Methode von Vijayalaxmi und Pridhoda verwendet, bei der fünf Qualitätskriterien bewertet wurden, darunter eine angemessene Dosimetrie, die Verwendung von Kontrollen, die Verwendung von Positivkontrollen, die Verwendung einer Verblindung und die Verwendung einer Temperaturüberwachung. Bei Beobachtungsstudien wurden folgende fünf Qualitätskriterien zur Bewertung herangezogen: angemessene Expositionsbewertung, angemessene Probandenauswahl/Vergleichsgruppen, Berücksichtigung von Störfaktoren, Follow-up-Bewertung und angemessene Ergebnisbewertung.

### Ergebnisse:

Die meisten der einbezogenen Studien waren experimentelle Studien (95 %) und wurden in Labors durchgeführt (88,6 %). Bei den Tieren gab es eine fast gleichmäßige Verteilung zwischen Wirbeltieren (52 %) und wirbellosen Tieren (48 %), wobei Insekten/Arthropoden (43 %), Vögel (36 %) und Säugetiere (10 %) die am häufigsten untersuchten Gruppen waren. Die Expositionsdauer wurde in 87 % der Studien erfasst, die Leistungsdichte und die SAR wurden in 72 % bzw. 30 % der Studien angegeben.

Die Autoren waren in der Lage, die Effektstärke für 291 (87 %) Studien aus den bereitgestellten Daten zu extrahieren, mit ähnlichen Anteilen für Studien über Fauna (88 %) und Flora (86 %). Die Mehrheit der Studien zur Fauna wies eine Effektgröße von unter 1 auf (62 %), verglichen mit 29 % der Studien zur Flora. Der Median der ES war bei Studien zur Flora höher (3,4) als bei der Fauna (0,7). Darüber hinaus gab es bei Studien zur Fauna signifikante negative Korrelationen zwischen ES und Expositions-niveau (Leistungsdichte und SAR) sowie der Expositionsdauer, was darauf hindeutet, dass Studien mit höherer und längerer Exposition weniger Auswirkungen berichteten. Dies widerspreche der Logik, da man erwarten würde, dass eine Zunahme der HF-EMF-Exposition das Ausmaß der Wirkung erhöhen würde, aber diese Inkonsistenz könnte mit der schlechten Qualität der meisten Studien zusammenhängen (nach Ansicht der Autoren).

Für die Flora gab es in allen Studien keine signifikanten Korrelationen zwischen ES und Expositions-niveau oder -dauer; obwohl es also keine Abnahme der Wirkung von HF EMF mit höherer Exposition gab, gab es auch keine Zunahme. Der mittlere „Quality-Score“ war bei der Fauna mit 2 (min. 0,25, max.

4,25) höher als bei der Flora, die einen Mittelwert von 1,82 (min. 0,5, max. 4,25) hatte. Insgesamt wurden die meisten Studien als „mangelhaft“ eingestuft, doch war der Anteil der „mangelhaften“ Studien für die Flora (66 %) höher als für die Fauna (58,8 %). Folglich gab es bei der Fauna mit 35,6 % mehr „durchschnittliche“ und 5,6 % mehr „gut“ bewertete Studien als bei der Flora, bei der 31,9 % der Studien als „durchschnittlich“ und nur 2,1 % der Studien als „gut“ eingestuft wurden.

Bei der Untersuchung der Korrelationen zwischen QS und den Parametern Expositionshöhe und -dauer wurden signifikante positive Korrelationen zwischen der Qualitätsbewertung und der SAR, der Leistungsdichte und der Expositionsdauer für Fauna-Studien gefunden. Dies deutet darauf hin, dass Studien, die höhere Expositionsniveaus für längere Zeiträume verwendeten, bessere Methoden einsetzten als Studien, die niedrigere Expositionsniveaus oder kürzere Zeiträume verwendeten. Dies spiegelte sich jedoch nicht in den Florastudien wider. Es liegen Informationen über das Ausmaß der Auswirkungen (d. h. die ES) in Abhängigkeit davon vor, ob die Exposition über oder unter den ICNIRP-Grenzwerten liegt.

Für die Fauna berichtete etwa ein Drittel der Studien mit einer Exposition oberhalb der Grenzwerte (8/23, 35 %) über keine Wirkung (d. h. ES = 0), verglichen mit 22 % (40/182) der Studien mit einer Exposition unterhalb der Grenzwerte. Darüber hinaus wiesen Studien mit einer Exposition oberhalb der Grenzwerte im Allgemeinen geringere Effektgrößen auf (Median ES: 0,2, Minimum: 0, Maximum: 4,3) als Studien mit einer Exposition unterhalb der Grenzwerte (Median ES: 0,8, Minimum: 0, Maximum: 112,2); auch dies „entzieht sich der Logik“, so die Autoren. Diese Ergebnisse könnten mit der Qualität der Studien zusammenhängen, da die durchschnittliche QS für Studien, die über eine Exposition unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte berichteten, 1,96 betrug, verglichen mit 2,35 für Studien, die über eine Exposition oberhalb der ICNIRP-Grenzwerte berichteten (Anmerkung der Red.: da es sich hier um minimale Unterschiede im QS handelt, ist diese Begründung zweifelhaft).

### Schlussfolgerungen:

Insgesamt wurde ein großer Teil der Studien als von geringer Qualität eingestuft, und aus der Analyse ergaben sich „Probleme“, die mit der Qualität der Studien zusammenhängen könnten. Es wurde erwartet, dass mit zunehmender Expositionshöhe

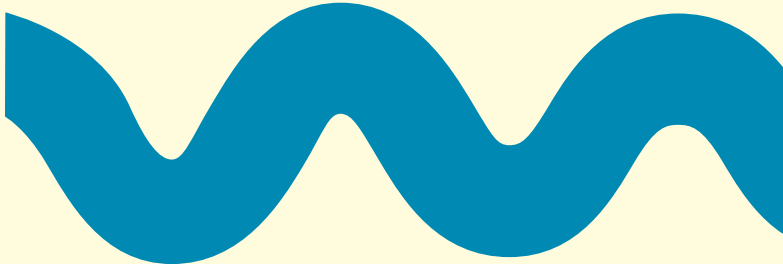
und -dauer auch die Effektgröße zunehmen würde, was typisch für eine Dosis-Wirkungsbeziehung ist. Es wurde jedoch eine umgekehrte Beziehung zwischen der Größe des Effekts und der Expositionshöhe (Leistungsdichte und SAR) sowie der Dauer der Studien bei Tieren festgestellt. Vergleichbare Trends, die in den Florastudien beobachtet wurden, waren statistisch nicht signifikant. Die abnehmende Effektgröße mit zunehmender Leistungsdichte entspricht auch den Ergebnissen der Übersichtsarbeit von (Cucurachi et al., 2013).

### Anmerkung der Redaktion:

Das thermische Paradigma, das besagt, dass alle biologischen Wirkungen von Hochfrequenzen (meistens im Mikrowellenbereich) durch eigentliche Erhitzung zustande kommen, würde sich bestätigt sehen, falls es eine klare Dosis-Wirkungsbeziehung gäbe. Das „Problem“, dass Brzozeks und Karipidis' Analyse dies eben nicht finden, und sie für die Fauna sogar eine umgekehrte Dosis-Wirkungsbeziehung finden, versuchen die Autoren weg zu erklären durch mangelnde Qualität der meisten eingeschlossenen Studien. Dies ist eine höchst fragwürdige Rechtfertigung, da im Normalfall auch Studien mangelhafter Qualität, im Durchschnitt betrachtet, die gleiche Effektstärke finden sollten wie Studien höherer Qualität, nur mit größeren Konfidenzintervallen / größerer Unsicherheit. Die nach Ockhams Rasiermesser einfachere und elegantere Erklärung wäre, dass das thermische Paradigma einfach falsch ist, und wahrscheinlich komplexere physikalische Prinzipien oder Mechanismen gebraucht sind, um die biologischen Wirkungen von EMF zu verstehen. Es war erfreulich zu sehen, dass die ursprüngliche „systematic map“ von 2023 „open-data“ veröffentlicht wurde, also mit direktem Zugang zur Excel-Tabelle der gesammelten Daten. Dies ist leider bei der vorliegenden nachfolgenden Auswertung nicht mehr gegeben. (AT)

Cucurachi, S., Tamis, W., Vijver, M., Peijnenburg, W., Bolte, J., & De Snoo, G. (2013). A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International*, 51, 116-140.

Karipidis, K., Brzozek, C., Mate, R., Bhatt, C. R., Loughran, S., & Wood, A. W. (2023). What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: A systematic map. *Environmental Evidence*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00304-3>



## Adressen für weitere seriöse Informationen

Diagnose-Funk e.V. - Umwelt und Verbraucherorganisation zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung e.V.,  
Deutschland:  
[diagnose-funk.org](http://diagnose-funk.org), [info@diagnose-funk.de](mailto:info@diagnose-funk.de)

Microwavenews, USA:  
[microwavenews.com](http://microwavenews.com), [louis@microwavenews.com](mailto: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](http://publichealth.berkeley.edu/people/joel-moskowitz)  
EMF-Homepage: [saferemr.com](http://saferemr.com)

Prof. Devra Davis (USA):  
[ehtrust.org](http://ehtrust.org), [info@ehtrust.org](mailto:info@ehtrust.org)

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

Blog von Prof. Darius Leszczynski (Finnland):  
[betweenrockandhardplace.wordpress.com](http://betweenrockandhardplace.wordpress.com)

## Datenbanken

[emfdata.org](http://emfdata.org)  
[emf-portal.de](http://emf-portal.de)  
[orsaa.org](http://orsaa.org)

