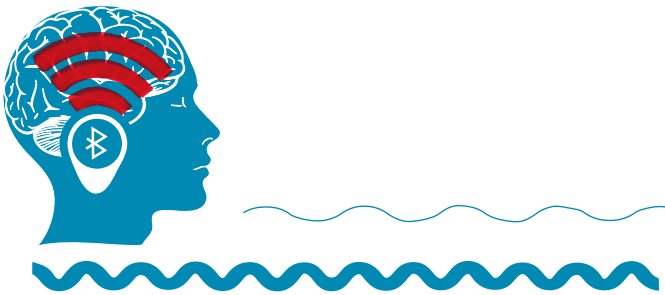
04/2025

ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer Felder für Umwelt und Gesundheit



Impressum

ElektrosmogReport Ausgabe 04/2025, 31. Jahrgang

Online Veröffentlichung auf www.EMFdata.org

Bestellung Printausgabe:
shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport, Bestellnr. 52504

Redaktion ElektrosmogReport

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

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

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

kontakt@diagnose-funk.de

Spendenkonto:

Diagnose-Funk e.V. | IBAN: DE39 4306 0967 7027 7638 00
BIC: GENODEM1GLS | GLS Bank

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

2G-Mobilfunk beeinflusst Hirnentwicklung

Veränderte Entwicklung von Nagetier-Gehirnzellen nach 900-MHz-Hochfrequenzbefeldung

Bodin R, Godin L, Mougin C, Lecomte A, Larrigaldie V, Feat-Vetel J et al. (2025). Altered development in rodent brain cells after 900 MHz radiofrequency exposure. Neurotoxicology. 2025;111(August). https://doi.org/10.1016/j.neuro.2025.103312

Obwohl die Grenzwerte für hochfrequente Mobilfunkstrahlung durch die ICNIRP definiert sind (0,08 W/kg für die Allgemeinbevölkerung, 0,4 W/kg für beruflich exponierte Individuen) ist unklar, ob diese Grenzwerte wirklich schützen. Frühere Studien liefern Hinweise, dass eine Befeldung mit vergleichbaren Stärken oxidativen Stress und verändertes Wachstum in Nagetieren hervorrufen kann. Insbesondere während sensibler Entwicklungsphasen könnten bereits bei diesen Schwellenwerten biologische Wirkungen auftreten. Das Ziel der vorliegenden Studie war es daher, sowohl *in vivo* als auch *in vitro* am Rattenmodell die Auswirkungen von 2G-Mobilfunk auf das sich entwickelnde Gehirn zu untersuchen. Dabei wurden die oben genannten ICNIRP-Grenzwerte eingehalten. Während der Gehirnentwicklung von Ratten werden die meisten Synapsen zwischen dem Tag nach Geburt (postnataler Tag, PNT 0) und dem PNT 21 gebildet, wobei die Synaptogenese (Synapsenneubildung) während des PNT 14 ihren Höhepunkt erreicht. Bei menschlichen Kindern wird dieser Höhepunkt im Alter zwischen 1 und 2 Jahren erreicht. Im Fokus der Untersuchung lagen proteomische Veränderungen sowie zelluläre Parameter wie Proliferation, Synaptogenese und Differenzierung neuronaler Zellen.

Studiendesign und Durchführung:

Die später untersuchten männlichen Sprague-Dawley-Ratten wurden bereits intrauterin ab dem 8. Gestationstag bis maximal zum 17. postnatalen Tag befeldet. Die 900-MHz-Befeldung wurde entweder mit den öffentlichen Grenzwerten (30,2 V/m; Ganzkörper-SAR: 0,08 W/kg) oder beruflichen Grenzwerten (67,5 V/m;

INHALTSVERZEICHNIS

SEITE

01 > 2G-Mobilfunk beeinflusst Hirnentwicklung

02 > Bluetooth beeinflusst menschliche neuronale Stammzellen

04 > WLAN und Alzheimer?

05 > Hochspannung und Kognition

06 > Hochspannungsleitungen und Honigbienen

07 > 900-MHz-Befeldung schädigt Knochenzellen *in vitro*

08 > Hochfrequenz verändert Stoffwechsel in Hodenzellen

09 > Review über Genotoxizität

11 > HF-Studien im Auftrag der WHO: Autoren voreingenommen?

13 > Hochfrequenz hat genetische Auswirkung

14 > Grundlagen der biologischen Effekte von EMF

Ganzkörper-SAR: 0,4 W/kg) durchgeführt. Die Kontrollen wurden scheinbefeldet. Insgesamt wurden n = 9 Kontrolltiere und jeweils n = 8 befeldete Tiere bestrahlt. Untersuchte Endpunkte waren proteomische Analysen des Hippocampus und Kortex direkt nach der Geburt sowie Quantifizierung des Wachstumsfaktors BDNF (brain-derived neurotrophic factor, essenziell für Bestand und Entwicklung von Nervenzellen und Synapsen, involviert in Gedächtnisprozessen) Zellproliferation, Synapsenanzahl und deren erregendes-inhibitorisches Gleichgewicht und oxidative Stressmarker im Hippocampus und Kortex an den PNT 8 und 17. (Aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte schwankte die Anzahl der Versuchstiere, die für die jeweilige Endpunktanalyse zur Verfügung stand, zwischen n = 3 und n = 9, Anm. d. Red.) Diese *in vivo* Untersuchungen wurden von *in vitro*-Analysen neuronaler Stammzellen ergänzt. Diese wurden über 3 oder 7 Tage mit 900 MHz und 0,08 W/kg befeldet. Die Wissenschaftler bewerteten Zelldifferenzierung, Zellproliferation und DNA-Schädigung.

Ergebnisse:

Die Proteomanalyse am PNT 0 identifizierte 10 unterschiedlich exprimierte Proteine der befeldeten Gruppen im Vergleich zur scheinbefeldeten Kontrollgruppe. Hierbei waren vor allem Proteine betroffen, die mit Synapsenbildung und Zellwachstum assoziiert sind. Im Hippocampus der befeldeten Jungtiere wurde eine signifikante Abnahme der Synapsenanzahl an PNT 8 festgestellt. Auch das Verhältnis erregender zu inhibitorischer Synapsen verschob sich bei beiden befeldeten Gruppen signifikant in Richtung inhibitorischer Synapsen. Beide Wirkungen nivellierten sich bis PNT 17. Im Kortex gab es keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Synapsenanzahl, das Verhältnis war jedoch an PNT 17 bei der stärker befeldeten Gruppe signifikant verändert. Im Kortex, nicht jedoch im Hippocampus, wurden signifikant weniger proliferierende Zellen an PNT 8 und eine signifikante Abnahme des BDNF-Spiegels an PNT 17 festgestellt. Die Untersuchung der oxidativen Stressmarker zeigte keine signifikanten Veränderungen. *In vitro* traten signifikant mehr apoptotische Zellen, proliferierende Zellen und DNA-Doppelstrangbrüche auf. Zudem kam es zu einer statistisch signifikanten Veränderung des Differenzierungsmusters der neurologischen Stammzellen.

Schlussfolgerungen:

Die Daten der Studie weisen darauf hin, dass selbst Expositionen im Bereich der regulatorischen Grenzwerte für die breite Bevölkerung die Hirnentwicklung negativ beeinflussen können. Zu diesen Veränderungen zählen verminderte Zellproliferation, BDNF-Spiegel und Synapsenbildung *in vivo* sowie veränderte Differenzierung neuronaler Stammzellen *in vitro*. Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass der erhöhte Anteil inhibitorischer Synapsen auf eine erhöhte neuronale Erregbarkeit des Organismus zurückzuführen sein könnte. Veränderungen dieses Equilibriums sind mit neuronalen Entwicklungsstörungen, wie z. B. Autismus-Spektrum-Störung, assoziiert. Zusammengefasst sehen die Wissenschaftler die Hypothese bestätigt, dass der sich entwickelnde Organismus anfällig gegenüber hochfrequenter Mobilfunkstrahlung ist. Sie empfehlen, Vorsicht beim Umgang mit drahtlosen Kommunikationsgeräten, insbesondere bei Schwangeren und Kleinkindern, walten zu lassen.

Anmerkungen der Redaktion:

Das Studiendesign überzeugt durch eine Kombination von *in vivo* und *in vitro* Experimenten und einem multimodalen Ansatz: Proteomik, Immunohistochemie und funktionelle Analysen. Die Bedeutung der Studie gewinnt auch durch die Verwendung niedriger Feldstärken, innerhalb regulatorischer Grenzwerte für die breite Bevölkerung, an Gewicht. Es bestehen jedoch auch Kritikpunkte, wie die geringe Anzahl an Versuchstieren, welche zusätzlich in Abhängigkeit der untersuchten Endpunkte schwankte. Die gewählten Untersuchungszeitpunkte sind hinsichtlich der neuronalen Entwicklung klug gewählt, eine Untersuchung im adulten Alter wäre jedoch wünschenswert gewesen, um persistierende funktionelle Konsequenzen analysieren zu können. Wie bei jedem Tiermodell stellt sich auch hier wieder die Frage der Übertragbarkeit auf den Menschen. Die zu bewertenden Daten sprechen jedoch dafür, dass regulatorische Grenzwerte nicht in allen Entwicklungsphasen als unbedenklich gelten dürfen. (RH)

Bluetooth beeinflusst menschliche neuronale Stammzellen

Hochfrequenz reguliert BET-vermittelte Signalwege bei der Differenzierung von Radialglia in der Entwicklung der menschlichen Großhirnrinde

Cakir B, Tanaka Y, Choe MS, Kiral FR, Kim J, Micali N et al. (2025). Radiofrequency regulates the BET-mediated pathways in radial glia differentiation in human cortical development. Cell Reports. 2025 Sep 24. https://doi.org/10.1016/j.celrep.2025.116238

Die Entwicklung des menschlichen Gehirns wird durch ein kompliziertes genetisches Programm gesteuert. Es ist eine Reihe von Genen bekannt, die im Zusammenhang mit neurologischen Entwicklungsstörungen wie Autismus-Spektrum-Störungen (ASS), geistiger Behinderung, Lernstörungen oder neuropsychiatrischen Störungen stehen. In jüngerer Vergangenheit wurde nachgewiesen, dass nicht-genetische Faktoren, wie pränataler Stress, Infektionen und Ernährung die Entwicklung des Gehirns beeinflussen. Ein weiterer Umweltfaktor, der im Verdacht steht, die Gehirnentwicklung zu beeinflussen, ist Mobilfunkstrahlung. Die Arbeitsgruppe benutzt kortikale Orga-

noide, aus humanen embryonalen Stammzellen, um die Auswirkungen von 2,4-GHz-Mobilfunk auf die Gehirnentwicklung zu untersuchen. Diese kortikalen Organoide weisen eine komplexe 3D-Architektur und zelluläre Vielfalt auf. Das Entwicklungsschema der kortikalen Organoide spiegelt die Phasen und Merkmale der menschlichen Kortikogenese wider. Dazu gehört die Bildung von apikalen radialen Gliazellen (aRG), die sich zu exzitatorischen (erregenden) Neuronen differenzieren.

Studiendesign und Durchführung:

Als 3D-Modell für das sich entwickelnde menschliche Gehirn in einer frühen Phase, wurden aus humanen embryonalen Stammzellen kortikale Organoide (hKO) gezüchtet, welche mit Beginn der Strukturierungsphase an Tag 10 entweder 12 h täglich oder kontinuierlich befeldet wurden. Als Befeldungsquelle wurde ein Bluetooth-Modul genutzt, welches mit 2,4 GHz (Bluetooth V2.0 + EDR) und einer Sendeleistung von 4 dBm (2,4 mW) betrieben wurde, was Bluetooth-Geräten mit geringer Leistung entspricht. Die maximal gemessene Feldstärke betrug 2,5 mW/m². Die Kontroll-hKO wurden in getrennten Inkubatoren kultiviert, das Hochfrequenz-Hintergrundrauschen wurde gemessen. Die Autoren untersuchten eine Vielzahl an Endpunkten mit diversen Methoden, darunter Immunohistochemie, Einzelzell-RNA-Sequenzierung, epigenetische Methoden (Einzelzell-ATAC-Sequenzierung; Chromatin-Erreichbarkeit), elektrophysiologische Aufnahme (Ganzzell-„Patch-Clamp"), Kalzium-Imaging und quantitative PCR.

Ergebnisse:

8 Tage nach Beginn der Befeldung beobachteten die Wissenschaftler eine signifikant verminderte Größe bzw. eine unregelmäßige Oberfläche der hKO. Die Untersuchung von Differenzierungsmarkern wies darauf hin, dass die Bluetooth-Befeldung die Selbsterneuerung der apikalen radialen Gliazellen (aRG) bevorzugt (symmetrische Zellteilung). Dies geht auf Kosten anderer Zellpopulationen, wie Tiefschichtneuronen. Dies weist auf eine gestörte Frühentwicklung der Großhirnrinde hin. Diese Beobachtungen wurden mit neuronalen Stammzellen von Rhesusaffen *in vitro* bestätigt. Transkriptomisch wurden statistisch signifikante Veränderungen an hKO beobachtet, welche mit Bluetooth befeldet wurden. U. a. waren Gene, die mit Neuroentwicklung und neuronaler Projektion assoziiert sind, betroffen, was darauf hinweist, dass die Frühentwicklung des menschlichen Gehirns durch Hochfrequenz beeinflusst werden kann. Auch Gene, die mit Autismus-Spektrum-Störung (ASS) in Verbindung stehen (u. a. FOXG1, AUTS2 und CPEB4), waren bei befeldeten hKO statistisch signifikant überexprimiert. Dies wurde durch drei unterschiedliche Methoden bestätigt (scRNA-seq, RT-qPCR und Immunohistochemie). Auch Retroposons, die mit ASS in Verbindung stehen, waren nach Befeldung statistisch signifikant erhöht. Zusammengefasst weist dies darauf hin, dass Mobilfunk bzw. Bluetooth in der Lage ist, sowohl ASS-Risiko-Gene als auch ASS-Risiko-Retroposons zu erhöhen. Beide Wirkungen wurden durch physikalische Barrieren in Form von Aluminiumfolie und Faraday-Abschirmung vermindert bzw. fast vollständig verhindert. Auch morphologisch bzw. funktionell wurden die Organoide durch die Hochfrequenz signifikant beeinflusst. Es wurde eine höhere Synapsendichte, einhergehend mit erhöhter neuronaler Aktivität, dokumentiert. Eine pharmakologische Inhibierung der Bromodomain- und Extraterminal-Proteine (BET) stellte eine ganze Reihe der Bluetooth-induzierten Schädigungen wieder her, darunter morphologische Veränderungen, Größe der hKO, ASS-assoziierte Gene sowie Differenzierungsmarker und Teilungsdynamik. Diese „Rettung" des Phänotyps deutet darauf hin, dass die RF-Wirkung über epigenetische Signalwege vermittelt wird, die wiederum über Histonacetylierung gesteuert werden. Tiefergreifende Analysen zeigten, dass die Zugänglichkeit des Chromatins durch die Hochfrequenz verändert wurde, mutmaßlich durch den Transkriptionsregulator NRF1.

Schlussfolgerungen:

Die vorliegende Studie zeigt, dass Bluetooth-Strahlung schädliche Wirkungen auf kortikale Organoide haben kann. hKO erweisen sich als ausgezeichnete Modelle, um Auswirkungen von Umwelteinflüssen wie Virusinfektionen, Ethanol, Nikotin oder Cannabis abzubilden. Die schädigenden Wirkungen der Hochfrequenz beinhalten veränderte Differenzierung neuronaler Stammzellen und Charakteristika von ASS-Patienten, welche durch physikalische Barrieren oder pharmakologische Behandlung abgeschwächt werden konnten. Diese Wirkungen stimmen mit Beobachtungen am Tiermodell überein, wo eine intrauterine HF-Befeldung kognitive und Verhaltensauffälligkeiten wie Hyperaktivität und Gedächtnisstörungen hervorrief (Aldad et al., 2012). Laut den Autoren schließe die Verwendung von hKO Lücken zwischen Tiermodellen und der menschlichen Neuroentwicklung.

Anmerkungen der Redaktion:

Sowohl Methodik als auch untersuchte Endpunkte sind in der vorliegenden Arbeit breit gefächert und erhöhen die Aussagekraft. Dies ist insbesondere gültig für Endpunkte, welche durch verschiedene molekularbiologische Methoden (z. B. RT-qPCR, scRNA-seq, Immunohistochemie) oder über verschiedene Spezies hinweg bestätigt werden. Die pharmakologische Behandlung des Phänotyps mit signifikanter Verbesserung stärkt die Publikation und bietet Erkenntnisse über mögliche mechanistische Zusammenhänge. Die Autoren benennen klar Limitationen ihrer Studie, darunter das Fehlen physikalischer Barrieren wie z. B. eines Schädels und die inhärente Grenze von Organoid-Modellen gegenüber in-vivo-Situationen. Dennoch wird an einem aussagekräftigen Modell (hKO) eine Schädigung der neuronalen Frühentwicklung gezeigt, welche bereits bei geringen Feldstärken (2,5 mW/m²) hervorgerufen wird. (RH)

Aldad TS, Gan G, Gao XB, Taylor HS (2012). Fetal radiofrequency radiation exposure from 800-1900 Mhz-rated cellular telephones affects neurodevelopment and behavior in Mice. Sci Rep. 2012;2. https://doi.org/10.1038/srep00312

WLAN und Alzheimer?

Überprüfung der Erkenntnisse zum Einfluss von WLAN-Strahlung im 2,4-GHz-Bereich auf oxidativen Stress und dessen möglichen Zusammenhang mit der Alzheimer-Krankheit

Laván D, Lluncor A, Moyano J, Ubillus J, Peña M, Paredes M et al. (2025). Review of the Evidence on the Influence of Wi-Fi 2.4 GHz Radiation on Oxidative Stress and its Possible Relationship with Alzheimer's Disease. Frontiers in Neurology. 2025 Oct 3;16:1616435. https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1616435

Eine neue Studie einer peruanischen Forschungsgruppe untersucht die Auswirkungen von 2,4-GHz-WLAN-Strahlung, insbesondere ihre Rolle bei oxidativem Stress und den möglichen Zusammenhang mit der Alzheimer-Krankheit (AD). Die Alzheimer-Krankheit ist multifaktoriell und ihre Entstehung ist in der Regel das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von genetischen, umweltbedingten und lebensstilbezogenen Faktoren.

Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren führten eine Literaturrecherche gemäß den PRISMA-Richtlinien durch. Der Review befasste sich mit drei Fragen:

1. Wie wirkt sich die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern mit 2,4 GHz auf die Genexpression im Zusammenhang mit der oxidativen Stressreaktion, der genomischen Stabilität, dem Stoffwechsel und der zellulären Regulation aus?
2. Wie beeinflusst die Regulierung von oxidativem Stress und Proteinhomöostase das Fortschreiten der Neurodegeneration bei Alzheimer?
3. Können Gene, die mit Alzheimer in Verbindung stehen, funktionell mit Genen interagieren, die an der DNA-Reparatur, dem Stoffwechsel und der zellulären Regulation beteiligt sind?

Ergebnisse:

49 Studien wurden für die Synthese und zur Kartierung genetischer Beziehungen herangezogen. Eine Reihe von Genen, darunter APOE und GSK3B, wurden direkt mit der Alzheimer-Krankheit in Verbindung gebracht. Im Allgemeinen (über die Pathogenese von AD hinaus) spielen die Gene MAGED4, HSPB8, HSPB6, HSF1, HSPA4, HSPB1 und MAPKAPK5 eine entscheidende Rolle bei der zellulären Reaktion auf oxidativen Stress, einem Schlüsselfaktor in der Pathogenese verschiedener Krankheiten. Diese Gene tragen zum Schutz der Zellen bei, indem sie die Proteinhomöostase regulieren, fehlgefaltete Proteine stabilisieren und die durch reaktive Sauerstoffspezies (ROS) induzierte Apoptose verhindern, was ihre Bedeutung für die Vorbeugung von oxidativem Stress bedingten Erkrankungen unterstreicht. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF) mit einer Frequenz von 2,4 GHz die Expression mehrerer Gene verändert, die mit der DNA-Replikation, der zellulären Homöostase und dem Stoffwechsel in Verbindung stehen. Unter diesen zeigen POLD4 und FEN1, die beide für die DNA-Replikation und -Reparatur unerlässlich sind, eine veränderte Expression, die die genomische Stabilität beeinträchtigen könnte. Darüber hinaus weist EXOG, das an der Reparatur der mitochondrialen DNA beteiligt ist, Veränderungen auf, die auf eine mögliche Störung der Mitochondrienfunktion hindeuten. Zusammengenommen deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass WLAN-Exposition die genomische Stabilität, den Stoffwechsel und die zelluläre Regulation erheblich verändern kann. Gene, die die Alzheimer-Krankheit regulieren ABCA7, PICALM, CLU, TREM2, APOE, SORL1, GSK3B und PRNP kreuzten sich mit den Genen HSP27 oder HSPB1 und HSP70 oder HSPA4 (alle aus der „heat shock protein"-Familie), die oxidativen Stress regulieren. Die Gene, die an der Regulierung der Alzheimer-Krankheit beteiligt sind, kreuzten sich mit den Genen POLD4, FEN1, EXOG (und 10 weiteren), die nach der Exposition gegenüber 2,4-GHz-WLAN eine verringerte Expression zeigten.

Schlussfolgerungen:

Jüngste Forschungen zur Alzheimer-Krankheit (AD) haben mehrere Gene identifiziert, die zu ihrer Pathogenese beitragen. Diese Gene befinden sich in einer hochdynamischen biologischen Umgebung, in der oxidativer Stress eine zentrale Rolle bei der mit Neurodegeneration verbundenen Zellschädigung spielt. Von besonderem Interesse bei der Alzheimer-Krankheit ist insbesondere die Aktivierung von Hitzeschockproteinen wie HSPB1 und HSPA4, die die Zellen vor oxidativem Stress schützen, da sie diesem entgegenwirken könnten. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass WLAN-Exposition die Expression von Genen verändern kann, die an DNA-Replikations- und Reparaturprozessen beteiligt sind, was darauf hindeutet, dass die Exposition gegenüber dieser Strahlungsfrequenz die genomische Stabilität und die Mitochondrienfunktion beeinträchtigen könnte. Obwohl die Autoren keine direkten Beweise für einen Zusammenhang zwischen WLAN-Exposition und AD finden konnten, ist der indirekte Zusammenhang über oxidativen Stress besorgniserregend und sollte weiter untersucht werden. (AT)

Hochspannung und Kognition

Auswirkungen von Hochspannungsmasten auf das Kleinhirn und kognitive Beeinträchtigungen bei Affen

Aliyari H, Sahraei H, Menhaj MB, Kazemi M, Vahidi B, Hosseinian SH (2024). Environmental Effect of High-voltage Towers on the Cerebellum and Cognitive Impairments in the Monkey. Basic and Clinical Neuroscience. 2024 Mar 1;15(2):185. http://dx.doi.org/10.32598/bcn.2021.1340.5

Hochspannungsleitungen schaffen eine schädliche Umgebung für Menschen, die in der Nähe dieser Leitungen leben oder arbeiten. Die extrem niederfrequenten Felder (ELF) um Hochspannungsleitungen haben erhebliche schädliche Auswirkungen auf das Gehirn und die kognitiven Funktionen von Tieren und Menschen, wie frühere Forschungen und epidemiologische Studien gezeigt haben. Um die direkten physiologischen Auswirkungen der HV (engl. Abk. für „high voltage" = Hochspannung)-Exposition zu untersuchen, wurde ein männlicher Rhesusaffe im Labor einer künstlich erzeugten Spannung von 3 kV/m ausgesetzt.

Studiendesign und Durchführung:

Für das Experiment wurden zwei erwachsene Rhesusaffen verwendet, einer als Versuchstier und einer als Kontrolltier. Das Versuchstier wurde einen Monat lang täglich vier Stunden lang einem simulierten Hochspannungsfeld von 3 kV/m ausgesetzt (dies entspricht der Feldstärke in etwa 20 Metern Entfernung von einer 275-kV-Stromleitung, Anm. d. Red.). Vor und nach der Feldanwendung wurden Verhaltenstests mit einem speziell für diesen Zweck entwickelten und gebauten Gerät durchgeführt. Es wurden zwei Tests durchgeführt, ein visueller Lerntest und ein visueller Gedächtnistest. Vor und nach der Feldanwendung wurde der Blutspiegel des adrenokortikotropen Hormons (ACTH) analysiert und die Expression des Glukokortikoidrezeptor-Gens (GR) untersucht. Veränderungen in der Anatomie des Kleinhirns wurden mit Magnetresonanztomographie (MRT) untersucht. Alle Tests wurden vor und nach dem Untersuchungszeitraum durchgeführt und mit dem Kontrollaffen verglichen.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse der Verhaltensstudie zeigten eine Abnahme der Leistung bei visuellen Lerntests bei dem getesteten Affen unter einem HV-Feld im Vergleich zum Zeitraum vor dem Test. Gleichzeitig zeigte die Kontrolle keine signifikanten Veränderungen. Der HV-exponierte Affe zeigte auch eine verminderte Leistung in Bezug auf das visuelle Gedächtnis im HV-Feld im Vergleich zum vorherigen Zustand. Der ACTH-Spiegel war bei dem exponierten Affen erhöht, während die Kontrollgruppe keine signifikante Veränderung aufwies. Bemerkenswert war, dass dieses Hormon innerhalb eines Monats nach der Erholung bei dem Testaffen immer noch abnahm (und auf den Ausgangswert zurückkehrte). Die Expression des Glukokortikoidrezeptor-Gens war bei dem exponierten Affen deutlich verringert, kehrte jedoch während einer einmonatigen Erholungsphase zum Ausgangswert zurück. Magnetresonanztomographie-Untersuchungen (MRT) des Kleinhirns ergaben keine signifikanten Veränderungen im Volumen. Allerdings wurde eine Blutung im linken Bereich des Kleinhirns des exponierten Affen festgestellt, jedoch erst nach der einmonatigen Exposition.

Schlussfolgerungen:

Die Studienergebnisse zeigen, dass der exponierte Affe während der Exposition gegenüber Hochspannungsfeldern signifikante kognitive und Verhaltensänderungen aufwies. Was die Verhaltensmerkmale betrifft, so war der getestete Affe vor dem Test intelligent, aufmerksam, lebhaft und vital und zeigte sich aktiv, doch nach der Testphase traten signifikante Veränderungen auf. Nach dem Test wurde der Affe unaufmerksam, lethargisch, inaktiv, lustlos und depressiv und verlor sogar etwa 1 kg an Gewicht. Der exponierte Affe wies nach dem Test einen erhöhten ACTH-Spiegel auf. ACTH ist ein Hormon, das als Regulator von Cortisol wirkt, welches eine wichtige Rolle bei kognitiven Indizes wie Gedächtnis und Lernen im Zentralnervensystem spielt. Ein Anstieg des ACTH-Spiegels reduziert die Ausschüttung von Cortisol, und abnormale Veränderungen der Cortisolsekretion führen zu psychischen Störungen. Cortisol hingegen spielt eine wesentliche Rolle bei der Expression des GR-Rezeptor-Gens. Die GR- und NMDA-Rezeptoren (die eine wichtige Rolle bei Gedächtnis- und Lernprozessen spielen) sind über das gesamte zentrale Nervensystem verteilt. Die höchste Konzentration an GR- und NMDA-Rezeptorgenen im zentralen Nervensystem findet sich im Hippocampus, im präfrontalen Kortex, in der Amygdala und im Kleinhirn. Den Ergebnissen dieser Studie zufolge stellen Hochspannungsmasten eine ernsthafte Gefahr für die kognitiven Fähigkeiten der Anwohner in der Umgebung dar, was weitere Untersuchungen in diesem Zusammenhang erforderlich macht.

Anmerkungen der Redaktion:

Dies ist eine gut durchgeführte Semi-Feldstudie, da eine realistische Nachahmung von echter Hochspannung verwendet wurde. Die Befunde im Verhalten wurden physiologisch bestätigt und plausibel erklärt. Die Studie verwendete allerdings nur ein Versuchstier (anstelle von 10 oder 30 Ratten, was statistisch stärkere Befunde ergibt). Doch bei der Verwendung von Affen als realistische, teure und ethisch fragwürdige Versuchstiere ist bereits ein einzelnes Versuchstier (mit Kontrolle) relevant. (AT)

Hochspannungsleitungen und Honigbienen

Schwache anthropogene elektrische Felder beeinträchtigen die Nahrungssuche von Honigbienen

Mallinson VJ, Woodburn FA, O'Reilly LJ (2025). Weak anthropogenic electric fields affect honeybee foraging. iScience. 2025 May 19. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112550

Während des Fluges neigen Bienen dazu, eine positive elektrostatische Ladung anzunehmen, während Blüten aufgrund ihrer elektrischen Verbindung zur Erde und des allgemein positiven atmosphärischen Potentialgradienten typischerweise negativ geladen sind. Diese Ladungsdynamik schafft eine elektrische Umgebung, die nicht nur Futtersignale liefert, sondern auch den Pollentransfer erleichtert. Die Bestäubung durch Tiere ist für etwa 75 % der Nahrungspflanzen und 35 % der weltweiten Nahrungsmittelproduktion verantwortlich, mit einem geschätzten jährlichen wirtschaftlichen Wert von 235 bis 577 Milliarden US-Dollar. Die folgende Studie untersuchte, wie der Besuch von Honigbienen an Blumen durch kleine elektrische Felder beeinflusst wird, die künstlich vor Ort erzeugt wurden, was diese Studie zu einer Semi-Feldstudie macht.

Studiendesign und Durchführung:

Um die Auswirkungen schwacher anthropogener E-Felder auf das Verhalten von Bestäubern zu untersuchen, wurden Feldversuche in Bristol, Großbritannien, durchgeführt. Die Forscher manipulierten die elektrische Umgebung von Blumen mit anthropogenen E-Feldern (die Wechsel- und Gleichspannung von Stromleitungen nachahmten) und beobachteten das Landeverhalten von Honigbienen. Die elektrischen Felder in der Nähe von zwei Katzenminzenblüten (im Abstand von 1,2 m) wurden mit einem tragbaren, batteriebetriebenen Funktionsgenerator im Freiland erzeugt. Das Futtersuchverhalten der Honigbienen, insbesondere das Landen auf den Blüten, wurde gleichzeitig an zwei Blüten beobachtet, der behandelten Blüte und der (scheinexponierten) Kontrollblüte.

Ergebnisse:

Als die elektrischen Felder experimentell verändert wurden, verringerte sich die mittlere Anzahl der Bienen, die auf den Blüten landeten, bei den Blüten, die einer Wechselstrom- bzw. Gleichstrombehandlung unterzogen wurden, um 70,8 % bzw. 52,6 % im Vergleich zu den Kontrollblüten. Im Gegensatz dazu wurde bei der negativen Gleichstrombehandlung kein Unterschied in der Landungsanzahl beobachtet. Was die zeitliche Variation der beobachteten Verhaltensweisen betrifft, so betrug die Landungsanzahl bei der Wechselstrombehandlung in den ersten zehn Minuten 5,9 % der Landungsanzahl bei der gepaarten Kontrollblüte. Die Landungszahlen stiegen in den folgenden zehn Minuten auf 58,8 % der gepaarten Kontrollblume. Bei DC-Feldern war der Effekt weniger ausgeprägt. Das für dieses Experiment verwendete AC-Feld entspricht den Umgebungs-E-Feldern in etwa 100 Metern Entfernung von einer 275-kV-Hochspannungsleitung.

Schlussfolgerungen:

Diese Studie zeigt, dass schwache, lokal begrenzte anthropogene E-Felder, deren Stärke mit denen vergleichbar ist, die in einer Entfernung von etwa 50 bis 150 Meter von Hochspannungsleitungen gemessen werden, das Sammelverhalten von Honigbienen verändern. Es ist daher denkbar, dass anthropogene E-Felder, wie sie beispielsweise von Hochspannungsleitungen erzeugt werden, das Sammelverhalten von Bestäubern und ihre Interaktion mit Blumen beeinflussen könnten. Erschwerend kommt hinzu, dass die hier verwendeten experimentellen E-Felder während des Versuchszeitraums in ihrer Stärke und Dynamik konstant waren und somit einen stabilen Reiz darstellten, während anthropogene E-Felder, wie sie beispielsweise von Hochspannungsleitungen erzeugt werden, aufgrund des variablen Stromverbrauchs im Laufe des Tages oft erhebliche Schwankungen in der Feldstärke aufweisen. Darüber hinaus konzentrieren sich die hier beschriebenen Ergebnisse auf kurzfristige Auswirkungen, und es sind weitere Untersuchungen erforderlich, um zu beurteilen, wie sich diese Reaktionen auf verschiedene Bestäuber, Pflanzenarten und umfassendere ökologische Netzwerke übertragen lassen. (AT)

900-MHz-Befeldung schädigt Knochenzellen *in vitro*

Regulation des Aktivierenden Transkriptionsfaktor 4 bei hochfrequenzinduzierter Ferroptose in Osteoblasten

Wang H, Zou W, Ding C, Cao Y (2025). Activating Transcription Factor 4 regulation of radiofrequency radiation-induced ferroptosis in osteoblasts. Electromagnetic Biology and Medicine. 2025 Aug 21:1-5. https://doi.org/10.1080/15368378.2025.2547799

Immer mehr Studien weisen auf einen Zusammenhang zwischen Mobilfunk und biologischen Reaktionen, darunter oxidativem Stress, DNA-Schäden und Apoptose, hin. Osteoblasten, die für die Knochenbildung von entscheidender Bedeutung sind, scheinen anfällig für Schädigungen durch Mobilfunk zu sein. Diese Wirkung könnte durch Ferroptose vermittelt werden, welche durch 3 Schlüssel-Signalwege reguliert wird: Glutathion/Glutathion-Peroxidase 4 (GSH/GPX4), Eisen-Metabolismus und Lipid-Metabolismus (Peroxidation mehrfach ungesättigter Fettsäuren). Die Arbeitsgruppe identifizierte mit bioinformatischen Analysen Atf4 als zentrales Gen, das an der Schnittstelle im Zusammenhang zwischen hochfrequenter Strahlung und Ferroptose steht. Dementsprechend untersuchten sie den Zusammenhang von 900-MHz-Befeldung, Ferroptose und ATF4 (Aktivierender Transkriptionsfaktor 4) in Osteoblasten *in vitro*.

Studiendesign und Durchführung:

Zunächst wurde eine Datenbankanalyse durchgeführt, um potenzielle Kandidaten zu ermitteln, welche unter Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) verändert und mit Ferroptose assoziiert sind. Die 900-MHz-Befeldung der murinen Osteoblasten-Zelllinie MC3T3-E1 wurde über 5 Tage hinweg, 4 Stunden täglich mit drei verschiedenen Intensitäten (50, 150 und 450 µW/cm²) durchgeführt. Diese Werte orientierten sich an dem von der ICNIRP empfohlenen Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung (2 W/m²). Kontrollen wurden scheinbefeldet. Als Endpunkte wurden Überlebensfähigkeit der Zellen, Lipidperoxidation (MDA), Glutathion (GSH), reaktive Sauerstoffspezies (ROS), Eisenhomöostase, Mitochondrienfunktion und die Bildung von Ferroptose-assoziierten Genen untersucht. Mittels „knockdown" (siRNA) und Überproduktion sowie pharmakologischen Ferroptose-Hemmern analysierten die Forscher die Rolle von ATF4.

Ergebnisse:

Die Experimente zeigten, dass insbesondere die mittlere Intensität (150 µW/cm²) der 900-MHz-Befeldung die Überlebensfähigkeit der Osteoblasten-Zelllinie signifikant verringerte. Außerdem wurden signifikant gesteigerte Lipidperoxidation, intrazellulärer Eisengehalt sowie mitochondriale Schäden, einhergehend mit einem gestörten antioxidativen Schutzmechanismus (verringertes GSH und Glutathionperoxidase 4), beobachtet. Zusammengefasst weist dies auf eine Ferroptose-Induktion durch die HF-Befeldung hin. Eine pharmakologische Ferroptose-Hemmung war imstande, die oben beschriebenen Endpunkte auf das Niveau der scheinbefeldeten Kontrollen zu bewegen. Der Knockdown des Schnittstellen-Gens Atf4 (wobei wenig effizient, RT-qPCR zeigt lediglich eine Reduktion um ca. 25 %, Anm. d. Red.) verstärkte die Ferroptose-Marker signifikant, während die Überexpression zu einem signifikanten Schutz der befeldeten Zellen vor Ferroptose führte.

Schlussfolgerungen:

Die Wissenschaftler kommen zu dem Schluss, dass die 900-MHz-Befeldung ohne Pulsmodulation *in vitro* selbst unterhalb von ICNIRP-Empfehlungen programmierten Zelltod in knochenbildenden Zellen hervorrufen kann. Eine bedeutsame Feststellung sei hierbei die nichtlineare Dosis-Wirkungs-Beziehung. Vielmehr sei von einem „Window-Effekt" (Wirkung nur innerhalb eines bestimmten Fensters) auszugehen. Dies untermauere die Komplexität biologischer Hochfrequenzinteraktionen. Die schützende Rolle von ATF4 gäbe einen Hinweis auf einen mechanistischen Zusammenhang zwischen Hochfrequenz und Knochenerkrankungen wie z. B. Osteoporose.

Anmerkungen der Redaktion:

Die übereinstimmenden Ergebnisse verschiedener molekularbiologischer Methoden, inklusive „Rettung" der Ferroptose durch Inhibitoren und Überproduktion von ATF4 untermauern die Aussagekraft der Studie. Auf der anderen Seite wurden die Daten lediglich *in vitro* und mit einer Zelllinie generiert. Die Autoren sind sich dieser Limitationen jedoch bewusst und schlagen selber eine *in vivo*-Überprüfung der Daten inkl. Untersuchung von downstream-Molekülen des ATF4 vor. Es existieren jedoch auch Hinweise darauf, dass HF-EMF *in vivo* schädigende Wirkungen auf Knochen haben können (Bektas et al., 2023, wir berichten im ElektrosmogReport 3-2023). (RH)

Bektas H, Nalbant A, Akdag MB, Demir C, Kavak S, Dasdag S (2023). Adverse effects of 900, 1800 and 2100 MHz radiofrequency radiation emitted from mobile phones on bone and skeletal muscle. Electromagn Biol Med [Internet]. 2023 Feb 16;1–9. https://doi.org/10.1080/15368378.2023.2179065

Hochfrequenz verändert Stoffwechsel in Hodenzellen

Unterschiedliche Stoffwechselreaktionen von Leydig- und Spermatogonienzellen der Maus auf Hochfrequenzbefeldung

Miao X, Lin Y, Guo J, Lin J, Gao P, Zhang W et al. (2025). Differential metabolic responses of mouse Leydig and spermatogonia cells to radiofrequency electromagnetic field exposure. Frontiers in Public Health. 2025 Sep 19;13:1623701. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1623701

Eine Reihe von Studien weist darauf hin, dass hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) schädigende Wirkungen auf die männliche Fruchtbarkeit haben können, u. a. durch Verminderung der Spermienqualität und Testosteronproduktion sowie genotoxische Wirkungen. Durch die Quantifizierung und Kennzeichnung von Metaboliten, ermöglicht das Feld der Metabolomik die Identifizierung gestörter Stoffwechselwege, Proteine und Gene, was Aufschluss über zugrundeliegende Mechanismen bieten kann. Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen von Hochfrequenz auf den Stoffwechsel von Maus Leydig-Zellen (TM3-Zelllinie) und Maus Spermatogonien (GC-1-Zelllinie) durch eine metabolomische Analyse.

Studiendesign und Durchführung:

Die Zelllinien (TM3 und GC-1) wurden 24 h lang entweder kontinuierlich oder im 1 h an/aus Intervall mit einer unmodulierten Frequenz von 1950 MHz und einem SAR-Wert von 3 W/kg befeldet, die Kontrollen scheinbefeldet. Die Temperatur wurde konstant bei 37 °C gehalten. Nach der Befeldung wurden Metabolite extrahiert, flüssigkeitschromatographisch aufgetrennt und massenspektrometrisch analysiert. Unterschiedlich gebildete Metabolite wurden mittels KEGG-Datenbank untersucht, um angereicherte Stoffwechselwege zu bestimmen. Außerdem wurde die Glutathion-Konzentration mittels ELISA ermittelt.

Ergebnisse:

Die Hochfrequenz-Wirkung war expositions- und zelltypspezifisch. Die statistisch signifikanten Veränderungen der Metabolite wiesen bei den kontinuierlich befeldeten TM3-Zellen auf substanzielle Störungen des Aminosäuremetabolismus und des Zitronensäurezyklus hin. Bei den unterbrochen befeldeten TM3-Zellen wiesen die Veränderungen hingegen auf Beeinträchtigungen des Energiestoffwechsels und Nukleotid-Signalwege hin. Die KEGG-Analyse zeigte bei der kontinuierlichen Befeldung signifikante Anreicherungen differentiell gebildeter Metabolite bei ABC-Transportern, anderen Membrantransportern und Glutathion-Stoffwechsel. Damit übereinstimmend wurde auch signifikant weniger Glutathion in den kontinuierlich befeldeten Zellen festgestellt. Bei beiden Befeldungsarten wurden Störungen im Purin-Metabolismus und der Lysin-Degradierung festgestellt. Unter anderem war das Schlüsselmolekül ADP betroffen. Bei der Spermatogonien-Zelllinie (GC-1) fiel die Hochfrequenzwirkung deutlich geringer aus. Lediglich bei der diskontinuierlichen Befeldung konnten Veränderungen im Fettstoffwechsel festgestellt werden, welche möglicherweise auf eine veränderte Membranintegrität hinweisen könnten.

Schlussfolgerungen:

Die Studie zeigt signifikante Stoffwechseländerungen in der Leydig-Zelllinie TM3 nach Befeldung mit 1950 MHz. Die Veränderung der GSH-Stoffwechselkomponenten bei der kontinuierlichen Befeldung wird durch signifikant gesenkte GSH-Spiegel bestätigt. Die Anreicherung differentiell gebildeter Metabolite in Stoffwechseltransportwegen könnte laut den Autoren auf eine eingeschränkte Fähigkeit der Zellen, toxische Substanzen zu entgiften und auszuscheiden, hindeuten. In Anbetracht der Tatsache, dass es sich bei der Spermatogenese um einen energetisch aufwändigen Prozess handelt, könnten Störungen im Energiestoffwechsel einen negativen Einfluss auf die Spermienbildung haben. Die unterschiedlichen, zelltypspezifischen Auswirkungen der Befeldung interpretieren die Autoren so, dass diese in engem Zusammenhang mit den funktionellen Rollen der Zellen und deren metabolischen Anforderungen stünden.

Anmerkungen der Redaktion:

Die Studie kann durch moderne chromatographische und massenspektrometische Methoden, multivariate Analysen und eine ergänzende Validierung durch ELISA aufwarten. Als Limitationen sind, auch von den Autoren selbst, die Verwendung eines reinen in-vitro-Systems zu nennen. Auch die Verwendung von Zelllinien ist negativ anzumerken. Der verwendete SAR-Wert ist mit 3 W/kg eher hoch, auch wenn ein Einfluss von Temperaturerhöhung durch die Temperaturüberwachung praktisch auszuschließen ist. Als Basis für weiterführende *in vivo*- und Dosis-Wirkungs-Beziehungsstudien ist die vorliegende Arbeit jedoch wertvoll, da sie belastbare Hinweise auf metabolische Reaktionen von reproduktiven Zellen auf hochfrequente Strahlung liefert. (RH)

Review über Genotoxizität

Eine Übersichtsarbeit und Evidenzkarte zu Hochfrequenzfeldbelastung und Genotoxizität: Bewertung von In-vivo-, In-vitro- und epidemiologischen Daten

Weller SG, McCredden JE, Leach VA, Chu C, Lam AK (2025). A scoping review and evidence map of radiofrequency field exposure and genotoxicity: assessing *in vivo*, *in vitro*, and epidemiological data. Frontiers in Public Health.;13:1613353. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1613353

Die Welt steht vor einer Krebspandemie, da viele Krebsarten ein exponentielles Wachstum aufweisen. Die Alterung der Bevölkerung trägt zwar zu diesem Trend bei, kann jedoch den beobachteten Anstieg bestimmter Krebsarten nicht vollständig erklären, was darauf hindeutet, dass Umwelt- und/oder Lebensstilfaktoren eine Rolle spielen. Ein möglicher Faktor, der in Betracht gezogen werden sollte, ist der weltweit steigende Hintergrundpegel anthropogener hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF), der mit einem allgemeinen Anstieg der Krebsinzidenzraten in den letzten Jahrzehnten korreliert. Genetische Veränderungen sind ein bekannter Auslöser für die Entstehung von Krebs. Studien, die die genotoxischen Auswirkungen der Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern untersuchen, haben eine Vielzahl von Parametern verwendet, und die Ergebnisse waren uneinheitlich. Eine systematische Kartierung der vorhandenen Forschungsergebnisse ist notwendig, um sich abzeichnende Muster zu identifizieren und zukünftige Forschung und Politik zu informieren. Die hier vorgestellte Übersichtsarbeit hatte zum Ziel, festzustellen, ob die Exposition gegenüber HF-EMF die DNA schädigen und damit möglicherweise zum weltweit steigenden Auftreten von Krebs beitragen kann.

Studiendesign und Durchführung:

Das Protokoll zur Erstellung der Evidenzkarte und der zugehörigen Datensynthese folgt der PRISMA-Richtlinie für Scoping Reviews (PRISMA-ScR). Die Studien wurden anhand spezifischer Qualitätskriterien einer Qualitätsbewertung unterzogen. Die Bewertung übernahm und erweiterte die von Vijayalaxmi und Prihoda (Prihoda TJ 2019) empfohlenen Qualitätsmerkmale. Zur Synthese der Daten nach Studientyp, Organismustyp, Expositionsniveau und -dauer, biologischen Markern (Genotoxizität, zellulärer Stress, Apoptose), HF-EMF-Signaleigenschaften sowie Finanzierungsquelle wurde eine quantitative Aggregation unter Verwendung von Tabellen, Grafiken und Heatmaps verwendet.

Ergebnisse:

Ausgehend von 3430 Kandidatenstudien wurden 517 relevante Studien identifiziert, die in die Kategorien In-vitro-Studien (53 %), In-vivo-Studien (37 %) und epidemiologische Studien (10 %) eingeteilt wurden. Die Gesamtbilanz der Evidenz für DNA-Schäden lag bei 59 % „Effekt“ gegenüber 41 % „kein Effekt“.

Die Ergebnisse der In-vitro-Studien tendierten leicht zu „kein Effekt” (55 %), während die Mehrheit sowohl der In-vivo-Studien (75 %) als auch der epidemiologischen Studien (75 %) statistisch signifikante DNA-Schäden berichtete. Bei Studien höherer Qualität verschob sich die Bilanz der Beweise für DNA-Schäden insgesamt zugunsten von „kein Effekt” (52 %) gegenüber „Effekt” (48 %). Die vereinfachte Umgebung von In-vitro-Studien kann zu einer Unterschätzung der durch HF induzierten genotoxischen Effekte führen. Um die biologischen Auswirkungen von HF-Expositionen vollständig zu verstehen, müssen In-vitro-Studien vorsichtig interpretiert und durch In-vivo-Forschung validiert werden. Studien am Menschen zeigten ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis (51 % gegenüber 49 %) der Beweislage, wobei In-vivo- und epidemiologische Untersuchungen durchweg statistisch signifikante DNA-Schäden berichteten, während In-vitro-Studien eher zu negativen Ergebnissen kamen. Ratten (75 %) und andere Säugetiere (73 %) zeigten ähnliche Trends. Alle Studien an Pflanzen, Würmern, Vögeln und Amphibien berichteten über statistisch signifikante DNA-Schäden. In ähnlicher Weise identifizierten 71 % der Insektenstudien statistisch signifikante DNA-Schädigungswirkungen. Etwa 80-100 % der Studien an Nicht-Säugetieren zeigten statistisch signifikante Auswirkungen, insbesondere DNA-Basenschäden und oxidativen Stress. Spindelstörungen, ein potenzieller Mechanismus für DNA-Schäden, wurden in 100 % der Studien sowohl an Säugetieren als auch an Pflanzen festgestellt. Studien, die extrem niedrige Expositionswerte (<0,001 W/kg) untersuchten, berichteten über den höchsten Anteil an genotoxischen Wirkungen (81 % von 21 Studien). Darüber hinaus nahm der Anteil statistisch signifikanter DNA-Schädigungsbefunde mit steigender Intensität ab. Bei extrem hohen Intensitäten (>10 W/kg), die die ICNIRP-Grenzwerte überschreiten, stieg der Anteil statistisch signifikanter DNA-Schädigungswirkungen jedoch wieder an (58 % von 59 Studien). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass DNA-Schädigungen keinem linearen Dosis-Wirkungs-Muster folgen (sondern einer U-förmigen Kurve) und dass nicht-thermische Mechanismen wahrscheinlich eine bedeutende Rolle bei HF-induzierten DNA-Schädigungen spielen.

Darüber hinaus variierten die Auswirkungen auch über die Studiendauer hinweg in einem U-förmigen Muster, wobei der höchste Anteil an Auswirkungen bei Studien mit langer (>3 Monate) und dann mittlerer (1 Tag-3 Monate) Dauer zu verzeichnen war, während bei Studien mit kurzer Dauer (1–24 Stunden) weniger Auswirkungen auftraten und bei akuten (<1 Stunde) Dauer wieder ein größerer Anteil an Auswirkungen zu verzeichnen war. Diese komplexe Wechselwirkung bestätigt frühere Hin-

weise von Lai und Levitt 2022 (Lai & Levitt 2022) auf nichtlineare Reaktionsmuster sowohl hinsichtlich der Intensität als auch der Dauer. Lineare Modelle sind für die Beschreibung der Ergebnisse in diesem Bereich nicht geeignet. Diese Ergebnisse stellen die stark vereinfachten Schlussfolgerungen einiger früherer Übersichtsarbeiten in Frage, die zu dem Ergebnis kamen, dass keine Auswirkungen vorliegen. Erhöhte Konzentrationen reaktiver Sauerstoffspezies wurden mit DNA-Schäden in Verbindung gebracht. Zellen setzen bei zellulärem Stress verschiedene Schutzmechanismen ein, darunter die Hochregulation von DNA-Reparaturgenen, Hitzeschockproteinen und Enzymen, die oxidativen Stress mildern. Die Genexpression ist ein zeitaufwändiger sequenzieller Prozess, der mit der Aktivierung von Signalwegen und der Bindung von Transkriptionsfaktoren beginnt, gefolgt von der mRNA-Verarbeitung und der Proteinsynthese. Diese Anpassungsmechanismen erklären wahrscheinlich die beobachteten U-Kurven für die Dauer der EMF-Exposition. Die reale HF-Exposition ist in der Regel chronisch und variabel, was Bedenken hinsichtlich kumulativer Effekte aufwirft. Während Reparaturmechanismen offenbar einen Großteil der Schäden kurzfristig beheben, kann eine längere oder wiederholte Exposition diese Abwehrmechanismen überfordern und zu dauerhaften genomischen Veränderungen führen.

Eine umfassende Analyse potenzieller Verzerrungen, bei der die Schwerpunkte der Autoren, die Finanzierungsquellen und die für die Veröffentlichung verwendeten Zeitschriften untersucht wurden, ergab einen starken Einfluss auf die berichteten Ergebnisse. Von Interessengruppen (z. B. Industrie, staatliche Telekommunikationsaufsichtsbehörden und US Air Force) finanzierte Forschungsarbeiten weisen einen höheren Anteil an Studien auf, die zu dem Schluss kommen, dass „keine DNA-Schäden" vorliegen, als Studien, die von Regierungen, Institutionen oder privaten/öffentlichen Quellen finanziert werden.

Von der Industrie oder dem Militär finanzierte oder mit diesen verbundene Forschungsarbeiten umfassten hauptsächlich In-vitro-Studien, wobei 30 % der 142 In-vitro-Studien und 26 % der 31 In-vivo-Studien statistisch signifikante Ergebnisse berichteten. Die Qualitätsfilterung hatte keinen signifikanten Einfluss auf diese Ergebnisse (25 % der 56 In-vitro-Studien bzw. 25 % der 12 In-vivo-Studien). Im Gegensatz dazu wurden 63 % der 465 experimentellen Studien als unabhängige Forschung eingestuft, darunter 130 (44,5 %) In-vitro-Studien und 162 (55,5 %) In-vivo-Studien. Insgesamt hatte die Studienqualität nur geringen Einfluss auf die unabhängige Forschung, wobei 74 % aller unabhängigen Studien (n = 292) statistisch signifikante DNA-Schäden zeigten, verglichen mit 73 % der 62 Studien höherer Qualität.

Die unabhängig finanzierte Forschung hat ein viel breiteres Spektrum an Experimenten durchgeführt und in erster Linie statistisch signifikante DNA-Schäden gemeldet. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die konservativeren Ergebnisse hochwertigerer Studien im Vergleich zu allen Studien insgesamt wahrscheinlich auf den hohen Anteil hochwertigerer Studien zurückzuführen sind, die von Forschern durchgeführt wurden, die von Interessengruppen finanziert wurden, auf den größeren Anteil von In-vitro-Studien mit kurzer Exposition und auf den Ausschluss epidemiologischer Studien.

Schlussfolgerungen:

All dies zeigt, wie methodische Präferenzen und potenzielle Interessenkonflikte die Ergebnisse von Studien (und Übersichtsarbeiten) von Natur aus verzerren, wodurch die Robustheit der gesamten Evidenzbasis verringert und Unsicherheit geschaffen wird. Um die U-förmige Dosis-Wirkungs-Beziehung zu bestätigen und ihre Auswirkungen besser zu verstehen, sollten zukünftige Forschungsarbeiten mehrere Assays über einen breiteren Bereich von Expositionsintensitäten und Zeitbändern hinweg einbeziehen und standardisierte Protokolle verwenden, um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Die Erkenntnisse aus der Evidenzkarte deuten darauf hin, dass mittel- bis langfristige HF-EMF-Expositionen, insbesondere bei niedrigen Intensitäten, durch nicht-thermische Mechanismen wie eine erhöhte Produktion freier Radikale und oxidativen Stress genetische Schäden verursachen können. Genetische Schäden können weitreichende, langfristige und möglicherweise irreversible Folgen haben. Um potenziellen genotoxischen Risiken vorzubeugen, sprechen diese Ergebnisse für die Einführung von Vorsichtsmaßnahmen zusätzlich zu den bestehenden thermischen Expositionsrichtlinien.

Anmerkungen der Redaktion:

Dieses Scoping Review aus Australien zeichnet sich durch exzellente Methodik und vielfältige Betrachtung von Studienbefunden aus. Die gesammelten Daten sind exzellent graphisch dargestellt, und auch die Schattenseiten dieses umkämpften Forschungsfeldes werden beleuchtet. (AT)

Prihoda TJ (2019). Comprehensive review of quality of publications and meta-analysis of genetic damage in mammalian cells exposed to non-ionizing radiofrequency fields. Radiation Research. 2019 Jan 1;191(1):20-30. https://doi.org/10.1667/RR15117.1

Lai H, Levitt BB (2022). The roles of intensity, exposure duration, and modulation on the biological effects of radiofrequency radiation and exposure guidelines. Electromagnetic Biology and Medicine. 2022 Apr 3;41(2):230-55. https://doi.org/10.1080/15368378.2022.2065683

Autoren voreingenommen?

Die von der WHO in Auftrag gegebenen systematischen Übersichtsarbeiten zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Hochfrequenzstrahlung bieten keine Gewähr für Sicherheit

Melnick RL, Moskowitz JM, Héroux P, Mallery-Blythe E, McCredden JE, Herbert M, Hardell L, Philips A, Belpoggi F, Frank JW, Scarato T (2025). The WHO-commissioned systematic reviews on health effects of radiofrequency radiation provide no assurance of safety. Environmental Health. 2025 Oct 2;24(1):70. https://doi.org/10.1186/s12940-025-01220-4

Die Weltgesundheitsorganisation WHO gab im Rahmen ihres „Electromagnetic Field" (EMF)-Projektes insgesamt 12 systematische Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen in Auftrag, deren Aufgabe darin bestand, Klarheit über die gesundheitlichen Auswirkungen von hochfrequenter (0–300 GHz) Strahlung zu schaffen. In diesem Frequenzbereich agieren unter anderem moderne drahtlose Kommunikationstechnologien (Mobiltelefone, WLAN-Router, Basisstationen etc.). Inhaltlich beschäftigten sich die Übersichtsarbeiten u. a. mit Krebsrisiken an Mensch und Versuchstieren, Einschränkungen der Fruchtbarkeit, kognitiven Defiziten, elektromagnetischer Hypersensibilität (EHS) und oxidativem Stress. Publiziert wurden die Übersichtsarbeiten im Zeitraum zwischen 2023 und 2025. Die hier vorgestellte Arbeit von Melnick et al. bewertet kritisch die methodische Qualität, Auswahlkriterien, Risiko- und Evidenzbewertung sowie die Interpretation der Ergebnisse durch die WHO-beauftragten Autorenteams.

Studiendesign und Durchführung:

Melnick et al. führen keine Primärstudie, sondern eine systematische Methodenkritik der 12 WHO-beauftragten systematischen Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen durch. Hierbei werden mögliche (1) Voreingenommenheit seitens der Autoren der Übersichtsarbeiten, (2) Einschluss- und Ausschlusskriterien von Primärstudien, (3) adäquates Design der einbezogenen Studien, (4) Vorgehensweise bei den Übersichtsarbeiten, (5) Meta-Analyse sowie (6) Risiko- und Evidenzbewertung analysiert.

Ergebnisse:

Zunächst kritisieren Melnick et al. die übermäßige Repräsentation von ICNIRP-Mitgliedern in den Autoren-Arbeitsgruppen der WHO-beauftragten Studien. In jeder Arbeitsgruppe war mindestens ein gegenwärtiges oder ehemaliges ICNIRP-Mitglied, in manchen sogar mehrere ICNIRP-Mitglieder vertreten. Einige Personen traten mehrfach in verschiedenen Review-Teams auf. Da die ICNIRP traditionell die Ansicht vertritt, dass thermische Wirkungen die einzige Gesundheitswirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder seien, sehen Melnick et al. ein hohes Risiko für eine systematische Voreingenommenheit der Autoren („groupthink bias"). Zu demselben Schluss kommt auch das frühere ICNIRP-Mitglied James C. Lin (Lin, 2021). Außerdem seien die Verbindungen der ICNIRP im Allgemeinen und einiger Autoren im Besonderen zur Industrie (Telekommunikation, Militär), welche ein großes wirtschaftliches Interesse an Grenzwerten hat, bedenklich.

Inhaltlich bemängeln Melnick et al. eklatante Mängel bei den Ein- und Ausschlusskriterien von Primärstudien bei diversen Reviews. Dies führte zum Ausschluss relevanter, gut durchgeführter Studien, während qualitativ unzulängliche Studien überproportional gewichtet wurden. Besonders deutlich wird dies am Beispiel von Hochfrequenzwirkung auf oxidative Stressmarker. Von ursprünglich 897 Artikeln, die Meyer et al. (Meyer et al., 2024) für ihre Übersichtsarbeit als geeignet erachteten, wurden nur 52 in ihre Metaanalyse aufgenommen. Das entspricht weniger als 6 %. 360 Primärstudien wurden ausgeschlossen, weil Biomarker verwendet wurden, die laut Meyer et al. ungeeignet für die Evaluation oxidativen Stresses seien. Mit der Nutzung adäquater scheinbefeldeter Kontrollen ist dieses Argument jedoch hinfällig und die untersuchten Biomarker sind verlässliche Indikatoren oxidativen Stresses. Auch gewählte Grenzwerte für die Feldstärke (z. B. E > 1 V/m) hatten zur Folge, dass Primärstudien mit geringen (und dadurch besonders relevanten, Anm. d. Red.) Befeldungen ausgeschlossen wurden. Meyer et al. erwähnten nicht einmal in der Beschreibung ihrer Inklusions- bzw. Exklusionskriterien den Ausschluss der Aktivität antioxidativer Schutzenzyme, welche seit geraumer Zeit und in einer Vielzahl von Studien als Biomarker für oxidativen Stress benutzt werden. Die Übersichtsarbeit von Meyer et al. ist dementsprechend nicht in der Lage, den aktuellen Forschungsstand widerzuspiegeln.

Es wurden jedoch nicht nur bei oxidativen Stressmarkern relevante Studien ausgelassen und methodisch unzulängliche Studien stark gewichtet. Im Falle der Auswirkungen von Hochfrequenz auf Krebs beim Menschen wurde sich z. B. stark auf die Ergebnisse der dänischen Kohortenstudie gestützt, die schwerwiegende methodische Mängel aufweist und von der Internationalen Agentur für Krebsforschung als nicht aussagekräftig eingestuft wurde. In einem zweiten Review zu „weniger gut erforschten" menschlichen Krebsarten wurden lediglich Primärstudien von 1988 bis 2019 inkludiert, was zum Ausschluss der UK-Biobank-Kohortenstudie führte, welche mit über 400.000 Teilnehmern zu den größten und bestdurchgeführten Studien in diesem Bereich gehört. Sie fand statistisch signifikant erhöhte Inzidenzen von diversen Krebsarten, so auch die Gesamtkrebsinzidenz, im Zusammenhang mit Mobiltelefonnutzung. Als weiteres Beispiel seien Unzulänglichkeiten bei der Evaluation der elektromagnetischen Hypersensibilität (EHS) genannt (Bosch-Capblanch et al., 2024). Bei der Beurteilung von Schlafstörun-

gen wurde keine einzige Studie einbezogen, welche Teilnehmer mit EHS umfasste. Außerdem wurden lediglich Leistungsdichte und Frequenz als Befeldungskriterien als relevant erachtet. Variablen, die möglicherweise eng mit EHS in Verbindung stehen, wie Magnetfelder, niederfrequente Pulsmodulation, Datenübertragung etc., wurden ignoriert. Melnick et al. identifizieren bei allen Publikationen in beinahe allen durchgeführten Meta-Analysen methodische Schwächen, mit Ausnahme der Übersichtsarbeit von Mevissen et al. (Mevissen et al., 2025), die aufgrund der Heterogenität der Primärstudien keine Meta-Analyse durchführte. Trotz hoher Heterogenität wurden zu den anderen Themen Meta-Analysen angefertigt. Neben der Heterogenität wurden reihenweise Meta-Analysen mit zu wenig Primärstudien (weniger als 5, häufig zwei), Primärstudien mit unterschiedlichen Studiendesigns (Fall-Kontroll- und Kohortenstudien) oder verschiedenen Endpunkten durchgeführt. Die daraus entstehenden Daten suggerieren eine Präzision der Ergebnisse, welche aufgrund der oben beschriebenen methodischen Mängel nicht existiert. Als weiteren Kritikpunkt bringen Melnick et al. die Anwendung der Risk-of-Bias-Instrumente und des GRADE-Systems an. Sie stellten fest, dass die Herabstufung der Evidenzstärke inkonsistent erfolgte. Außerdem sei die Dokumentation der Bewertungsentscheidung und die Nachvollziehbarkeit der GRADE-Schritte oft unzureichend gewesen. 8 der 12 WHO-finanzierten Studien schlussfolgern aus ihren Daten, dass HF-EMF wahrscheinlich keine gesundheitsschädigenden Wirkungen besitzen. Diese Schlussfolgerungen beruhen allesamt auf Daten, deren Evidenzstärke von den Autoren als unsicher oder sehr unsicher eingestuft wurde. Dies stellt einen logischen Fehler dar, da im Umkehrschluss auch eine unsichere oder sehr unsichere Evidenz vorliegt, dass HF-EMF unbedenklich sind.

Schlussfolgerungen:

Melnick et al. finden in nahezu allen WHO-Reviews wiederkehrende und systematische methodische Mängel. Diese beinhalten übermäßig restriktive Einschlusskriterien, fehlerhafte Expositionsdefinitionen, unangemessene Meta-Analysen mit geringer Studienzahl, selektive Gewichtung von Ergebnissen, inkonsistente Anwendung der Bewertungsinstrumente und potenzielle Interessenkonflikte der Autoren. Anstatt die wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Gesundheitsrisiken von HF-EMF umfassend zu bewerten, vermitteln diese Übersichtsarbeiten ein falsches Gefühl der Sicherheit, was die Gesundheit der Allgemeinbevölkerung riskiert. Abgesehen davon seien in den Übersichtsarbeiten zu Krebs und Fortpflanzung bei Tierversuchen konsistente Hinweise auf schädigende Wirkungen gefunden worden. Aus Sicht der Arbeitsgruppe um Melnick seien die Belastungsgrenzwerte der FCC und ICNIRP veraltet und basierten auf ungültigen Annahmen (thermisches Dogma). Neue, wissenschaftlich fundierte Richtlinien, die die menschliche Gesundheit und Umwelt angemessen schützen, seien dringend erforderlich. Aufgrund der schwerwiegenden Mängel seien die meisten Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen, die von der WHO in Auftrag gegeben wurden, nicht geeignet, um als Nachweis für die Sicherheit von Mobiltelefonen und anderen drahtlosen Kommunikationsgeräten herangezogen zu werden.

Anmerkungen der Redaktion:

Diese ungewöhnlich harsche Kritik stützt sich auf dokumentierte methodische Prozesse. Die angesprochenen Kritikpunkte sind allesamt valide und nachvollziehbar. In Anbetracht des Umfangs der methodischen Mängel und der Suggestion von Belastbarkeit der Befunde, welche nicht existiert (Stichwort Meta-Analyse), muss die Frage erlaubt sein, inwiefern Absicht und Methode hinter der Verharmlosung von Mobilfunk stehen. (RH)

Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eyers J et al. (2024). The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. Environment International, 187(October 2023). https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108612

Lin JC (2021). Science, Politics, and Groupthink [Health Matters]. IEEE Microwave Magazine, 22(5), 24–26. https://doi.org/10.1109/MMM.2021.3056975

Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW et al. (2025). Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. Environment International, 199(February 2024), 109482. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109482

Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B et al. (2024). The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on biomarkers of oxidative stress *in vivo* and *in vitro*: A systematic review of experimental studies. In Environment International (Vol. 194, Issue July). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108940

Hochfrequenz hat genetische Auswirkung

Hochfrequenzstrahlung induziert Genexpression

Lai H, Levitt BB (2025). Radiofrequency radiation-induced gene expression. Reviews on Environmental Health. 2025 Oct 29(0). https://doi.org/10.1515/reveh-2025-0104

Die Veränderung der Expression (Prozess, bei dem die genetische Information in ein funktionales Produkt überführt wird) von Genen passiert als Reaktion auf eine Veränderung ihrer Umgebung und dient dazu, das zelluläre Gleichgewicht wiederherzustellen. Es handelt sich um einen adaptiven Mechanismus. Die Art und Weise der Veränderungen spiegelt wider, wie die Zellen durch Störfaktoren beeinflusst werden. Die Autoren fassen in ihrer narrativen Übersichtsarbeit umfangreiche wissenschaftliche Literatur zu den Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) auf die Genexpression zusammen.

Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren werteten für ihre narrative Übersichtsarbeit mehr als 500 Primärstudien aus, die genetische Wirkungen von Hochfrequenz beschreiben. Der Schwerpunkt lag auf Studien, die Frequenzen zwischen 800 und 2500 MHz untersuchten, einem typischen Spektrum von drahtlosen Kommunikationsgeräten. Die Primärstudien umfassten In-vitro- und In-vivo-Modelle, akute und chronische Befeldung und eine breite Palette von Modellorganismen – von Zellkulturen verschiedener Herkünfte über Nagetiere und Insekten bis hin zu Pflanzen. Inhaltlich wurden 6 Kategorien von Genexpressionsfeldern behandelt: 1. Reparatur und Entfernung beschädigter Proteine, 2. DNA-Schäden, 3. oxidative Prozesse, 4. Stressreaktionen, 5. Apoptose und 6. Gehirnfunktionen. Die Befeldungsparameter schwankten erheblich mit SAR-Werten zwischen einigen µW/kg bis hin zu 20 W/kg.

Ergebnisse:

In Anbetracht der stark unterschiedlichen Studiendesigns der Primärstudien verwundert es nicht, dass die Studien ein heterogenes Bild zu den veränderten Genexpressionen zeigen. Konsistent ist jedoch, dass hochfrequente Strahlung in der Lage ist, die Expression von Genen zu verändern, die an zentralen zellulären Prozessen beteiligt sind. So werden beispielsweise wiederholt Gene von Hitzeschockproteinen (Hsp70 & Hsp90) hochreguliert (Trotz ihres Namens reagieren Hitzeschockproteine auf alle möglichen zellulären Stressfaktoren und helfen u. a. dabei, die DNA zu schützen und geschädigte zelluläre Komponenten abzubauen, Anm. d. Red.). Auch wurden Veränderungen von Genen festgestellt, die mit DNA-Schäden bzw. der Reparatur dieser assoziiert sind, wie z. B. p53 und p21. Weitere Themenfelder, bei denen wiederholt adaptive Genexpressionen festgestellt werden, sind oxidative Prozesse (z. B. antioxidative Schutzenzyme, Hsp70), programmierter Zelltod (pro- und anti-apoptotisch), sowie Gene, die mit Funktionen des Gehirns in Zusammenhang stehen. Dazu zählen u. a. Neurotransmitter-Gene, NMDA-Rezeptor-Gene und krebsassoziierte miRNA. Bei einem SAR von weniger als 0,4 W/kg wurden vierzig verschiedene Genexpressionswirkungen der hochfrequenten Strahlung festgestellt.

Schlussfolgerungen:

Veränderungen der Genexpression liefern laut den Autoren ein starkes Argument dafür, dass Hochfrequenz die Zellfunktionen beeinflusst. Es handele sich dabei um eine direkte Reaktion auf eine exogene Belastung und einen Prozess zur Wiederherstellung des Normalzustandes. Die Funktion bzw. Assoziation der veränderten Gene gäbe Aufschluss über die Wirkung, die Hochfrequenz auf die Zellen habe. Es sei z. B. irrational, davon auszugehen, dass Gene, die mit der Reparatur von DNA-Schäden verknüpft sind, hochreguliert werden, wenn keine DNA-Schäden in den Zellen existierten. Aufgrund der Komplexität der Interaktion von Hochfrequenz mit Zellen sei eine nicht-lineare Dosis-Wirkungsbeziehung zu erwarten und damit einhergehend auch Studien, bei denen keine biologische Wirkung von hochfrequenter Strahlung auf die Genexpression festzustellen sei. Die Häufigkeit von Wirkungen bei niedrigen Intensitäten (SAR< 0,4 W/kg) wirft Fragen zur Angemessenheit aktueller Expositionsrichtlinien auf. Lai und Levitt plädieren für tiefergreifende Forschung zur veränderten Genexpression durch HF, insbesondere in zwei Bereichen: zum einen die Beteiligung zellulärer Stressreaktionen an der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse sowie die Auswirkungen auf das limbische System. Zum anderen zelluläre Oxidationsprozesse mit Augenmerk auf die Induktion freier Radikale.

Anmerkungen der Redaktion:

Als narrative Übersichtsarbeit erhebt die vorliegende Studie keinen Anspruch auf eine vollständige und statistische Auswertung aller relevanten Primärstudien. Trotzdem wird eine breite Masse von Primärstudien mit unterschiedlichen Designs, Endpunkten und Resultaten herangezogen, um ein wiederkehrendes Muster herauszuarbeiten. (RH)

Grundlagen der biologischen Effekte von EMF

Die Kollision zwischen Drahtlostechnik und Biologie

Héroux P (2025). The collision between wireless and biology. Heliyon. 2025 May 1;11(10). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42267

Die Energie- und Telekommunikationsindustrie hat zwei Argumente vorgebracht, um ihre Ansicht zu untermauern, dass die Exposition des Menschen gegenüber nicht-thermischer, nicht-ionisierender Strahlung unbedenklich ist. Erstens handelt es sich um nicht-ionisierende Strahlung. Zweitens sind die Energiequanten der Strahlung zu schwach, um die konkurrierende Energie der thermischen Bewegung (der Wassermoleküle) zu überwinden. Die interessanten wissenschaftlichen Prinzipien, die für diese Diskussion relevant sind, wurden durch mächtige finanzielle Interessen verschleiert. Infolgedessen dauert die Kontroverse über die gesundheitlichen Auswirkungen nicht-thermischer elektromagnetischer Strahlung (NTEMR) schon viel länger an als nötig. Die industrienahen Gremien IEEE und ICNIRP haben die spezifische Absorptionsrate (SAR) und den damit verbundenen Temperaturanstieg als einzigen Maßstab für die biologischen Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern übernommen. Nur eine Gewebeerhitzung über 1°C wird als relevant angesehen. Dies verdeutlicht die apriorische Überzeugung, dass Wärme der einzige mögliche Schadensfaktor ist und dass langfristige Auswirkungen nicht wichtig genug sind, um berücksichtigt zu werden.

Historische Übersicht und Erweiterung der thermodynamischen Konzepte:

Im Jahr 1889 hat Arrhenius das Konzept der Aktivierungsenergie formuliert, eine Barriere, die überwunden werden muss (z.B. durch Erhitzung), bevor zwei Moleküle reagieren können. Eine verbesserte Formulierung für chemische Reaktionsgeschwindigkeiten wurde 1935 von Eyring vorgeschlagen. Im Gegensatz zur Arrhenius-Gleichung, die auf Gase beschränkt war, umfasste ihr Anwendungsbereich auch kondensierte Materie wie Flüssigkeiten oder Feststoffe. Eine weitere Verfeinerung der Reaktionsgeschwindigkeiten wurde 1977 von Bennet und Chandler beigesteuert, die als Ausdruck für die Gesamtheit der in lebenden Systemen ablaufenden Reaktionen interpretiert werden kann. Die Aufrechterhaltung des Lebens (Homöostase) erfordert eine kontinuierliche Anordnung von Atomen und Molekülen zu Verbänden. Die Entwicklung dieser komplexen Strukturen verringert die Entropie ($-\Delta S$) und wirkt damit der universellen Tendenz zu Unordnung und Gleichförmigkeit entgegen, die durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik vorgegeben ist. Leben erfordert und bildet geordnete Strukturen, wofür Energie aus der Umgebung (Sonnenlicht oder Nahrung) benötigt wird, und auch Energie an die Umgebung wieder abgegeben wird. Die erforderliche Energie stammt aus Redoxreaktionen, bei denen Elektronen übertragen werden. Bei diesen Elektronenübertragungen kommt es zwangsläufig zu Elektronenverlusten. Es sind diese Elektronenverluste, die von Sauerstoff als reaktive Sauerstoffspezies (ROS) eifrig aufgefangen werden und den Anstieg der Entropie bewirken, der erforderlich ist, um zumindest die durch die Biosynthese verlorene Entropie auszugleichen. Die negativen Auswirkungen von ROS werden durch enzymatische Antioxidantien wie Superoxiddismutase, Katalase und Glutathion sowie nicht-enzymatische Antioxidantien wie Vitamin C und E kontrolliert.

Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik werden lebende Gewebe zwangsläufig aktiv ionisiert und erzeugen durch ihre Stoffwechselaktivität ROS. Die Tatsache, dass Leben seine eigene Stoffwechselenergie bereitstellt und Reaktionen unabhängig von der durch elektromagnetische Felder zugeführten Energie aktiviert, beseitigt alle Einwände gegen die gesundheitlichen Auswirkungen von NTEMR. Die Bewegung von Elektronen von der Nahrung zum Sauerstoff innerhalb der Mitochondrien in unserem Körper wird als Elektronentransportkette bezeichnet. Der Prozess, bei dem der Sauerstoff mit Fettsäuren aus der Nahrung in den Mitochondrien kombiniert wird, wird als oxidative Phosphorylierung (OXPHOS) bezeichnet. Eine einzelne OXPHOS-Kette besteht aus vielen Enzymen, von denen einige sehr große Moleküle sind, die als Komplexe I bis V bezeichnet werden. Elektronen- und Protonenströme zirkulieren kontinuierlich zwischen den Komplexen. Diese wandernden Elektronen werden zwangsläufig von externen elektromagnetischen Wechselfeldern angezogen, wodurch sich ihre Position und Zirkulation ändern. Das Enzym Komplex I ist etwa 1,7 Milliarden Mal massiver als ein Elektron und bildet einen unbeweglichen Bezugspunkt für die NTEMR-Wirkung auf Elektronen. Obwohl OXPHOS-Einheiten nur wenige hundert Nanometer groß sind, sind unzählige davon im menschlichen Körper verstreut. Der menschliche Körper beherbergt Billiarden von Leitern mit einer Größe von wenigen hundert Nanometern, die kontinuierlich die zur Aufrechterhaltung der Zellenergie erforderlichen Elektronen- und Protonenströme transportieren.

Der Autor erweitert die zuvor erwähnte Bennett-Chandler-Gleichung, indem er den bei hochfrequenten EMF häufig beobachteten Scheitelfaktor des Signals einbezieht, der angibt, wie extrem die Spitzenwerte innerhalb des Signals sind: ein höherer Scheitelfaktor verstärkt die nicht-thermischen biologischen Effekte. Der Scheitelfaktor ist von 1G auf 5G stetig angestiegen. Darüber hinaus impliziert gemäß dem Shannon-Hartley-Theorem zur Informationsübertragung die stetig steigende Datenübertragungsgeschwindigkeit moderner Kommunikationssignale an sich die Notwendigkeit höherer Scheitelfaktoren innerhalb des Signals und damit stärkere biologische Effekte. Die hier von Héroux präsentierte Analyse zeigt, dass die Ansichten der IEEE/ICNIRP zu den gesundheitlichen Auswirkungen von NTEMR aus dem späten

19. Jahrhundert stammen, da diese bislang nur auf der Arrhenius-Gleichung, d.h. dem Konzept der Aktivierungsenergie, basieren.

Schlussfolgerungen:

Die Modellierung lebender Gewebe als Zucker/Wasser/Salz (wie im Fall der SAR) lässt das wesentlichste Element des Lebensprozesses außer Acht, nämlich den kontinuierlichen Elektronen- und Protonentransport, der durch den Stoffwechsel aufrechterhalten wird. Diese Ströme sind anfällig für NTEMR, insbesondere im Hinblick auf die OXPHOS. In einem vollständigeren Modell (als dem, das von der ICNIRP verwendet wird) und ausgehend vom Prinzip der Überlagerung verändern oszillierende elektrische oder magnetische Felder, die aus der Umgebung eindringen, die Elektronen- und Protonenströme des Gewebes. Um biologisch aktiv zu sein, muss NTEMR selbst keine ionisierten Ziele oder elektronischen Ströme erzeugen, sondern nur diejenigen stören, die bereits durch die Biologie bereitgestellt werden. Die derzeitige (offizielle) Umweltperspektive ist mangelhaft, da eine umfangreiche technische Toolbox zur Verfügung steht, um die NTER-Exposition zu mindern: Glasfaser, Drahtverdrillung, Erdungsmaßnahmen, Gleichstrom.

Anmerkungen der Redaktion:

Die hier präsentierte historische Chronik und Erweiterung der thermodynamischen Gleichung für biologische Effekte ist ein neuer und interessanter Ansatz. Viele Studien belegen oxidativen Stress als Hauptauswirkung von nicht-thermischer elektromagnetischer Strahlung. Panagopoulos' Theorie der Aktivierung von spannungsgesteuerten Calcium-Kanälen ist experimentell belegt (und löst auch oxidativen Stress aus), wenn auch theoretisch / biophysikalisch bislang unbestätigt. Der hier verwendete thermodynamische Ansatz kann direkte Bildung von ROS in den Mitochondrien durch Störung der Elektronen- und Protonenflüsse in der OXPHOS erklären, ist aber nur teilweise experimentell bestätigt und auch noch nicht biophysikalisch per Computermodellierung bestätigt. Es scheint allerdings plausibel, dass mehrere biologische Prozesse gleichzeitig und durch verschiedene Mechanismen gestört werden. (AT)

Adressen für weitere seriöse Informationen

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

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

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

Prof. Joel Moskowitz, Director of the Center for Family and Community Health at the School of Public Health, Berkeley (USA):
Institutshomepage: publichealth.berkeley.edu/people/joel-moskowitz
EMF-Homepage: saferemr.com

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

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

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

Datenbanken

emfdata.org
emf-portal.de
orsaa.org