

ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer
Felder für Umwelt und Gesundheit



900 MHz und Homöostase

Mobilfunkstrahlung stört die Homöostase und steigert die Nahrungs- aufnahme beim Menschen

Wardzinski EK, Jauch-Chara K, Haars S, Melchert UH, Scholand-Engler HG, Oltmanns KM, (2022): Mobile Phone Radiation Deflects Brain Energy Homeostasis and Prompts Human Food Ingestion. *Nutrients* 14, 339; <https://doi.org/10.3390/nu14020339>

Vor 30 Jahren begann die weltweite Verbreitung des Mobiltelefons, heute sind etwa 6 Milliarden Geräte in Betrieb. Gleichzeitig stiegen weltweit Körpergewicht und Fettleibigkeit in der menschlichen Bevölkerung an. Fettleibigkeit ist eins der größten Gesundheitsrisiken, tatsächlich ist eins von 5 Kindern und Jugendlichen in der Welt übergewichtig und besonders solche sind betroffen, die Mobilfunk stark nutzen. Auf den ersten Blick scheint der Zusammenhang weit hergeholt. Aber: Die elektromagnetischen Felder der Mobiltelefone werden zu mehr als 80 % vom Kopf des Nutzers absorbiert, bei Kindern und Jugendlichen mehr als bei Erwachsenen. Die Strahlung dringt in das Gehirn ein, beschleunigt den Glucose-Stoffwechsel des Gehirns, beeinflusst das EEG und verändert die Erregbarkeit der Nervenzellen. Nahrungsaufnahme, Appetit-Wahrnehmung und Sättigungsgefühl werden vom Hypothalamus reguliert. Experimente mit Ratten ergaben, dass das Körpergewicht bei den erwachsenen Tieren anstieg, wenn sie als junge Tiere 2 Stunden täglich bestrahlt worden waren. Ein anderes Experiment zeigte, dass bestrahlte Tiere mehr Futter aufnahmen als die Kontrolltiere. Vor diesem Hintergrund fragten sich die Autoren, ob zwischen Mobilfunkstrahlung und Nahrungsaufnahme eine Verbindung besteht. Sie testeten, ob auch Menschen mehr Nahrung aufnahmen bei akuter Bestrahlung mit Mobilfunkfrequenzen. Weil gepulste und amplitudenmodulierte Mikrowellen bei Ratten die Homöostase im Gehirn beeinflussen und der Energiestatus im Gehirn eine wichtige Rolle bei der Nahrungsaufnahme und der Körpergewichtsregulation spielt, nahmen die Forscher an, dass die Mobilfunkstrahlung auf die Energiehomöostase des Gehirns einwirkt und so die Nahrungsaufnahme beeinflusst.

Impressum

ElektrosmogReport 01-2022, 28. Jahrgang
Online Veröffentlichung auf www.EMFdata.org
Bestellung Printausgabe:
shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport, Bestellnr. 52201

Redaktion ElektrosmogReport

Dipl. Biol. Isabel Wilke (IW), Roman Heeren (RH), M.Sc.,
Alain Thill (AT), M.Sc., Kontakt: emf@katalyse.de

Herausgeber und V.i.S.d.P

Diagnose-Funk e.V.
Postfach 15 04 48
D-70076 Stuttgart
kontakt@diagnose-funk.de

Spendenkonto:

Diagnose-Funk e.V.
IBAN: DE39 4306 0967 7027 7638 00
BIC: GENODEM1GLS | GLS Bank
Ermöglichen Sie mit Ihrer Spende die Aufarbeitung und
Analyse der Forschungslage und die weitere Herausgabe
des ElektrosmogReport

INHALTSVERZEICHNIS

WISSENSCHAFT SEITE 01 > 900 MHz und Homöostase

03 > 2,45 GHz beeinflusst Hodenentwicklung

04 > HF-Wirkung auf Fortpflanzung

05 > HF-EMF verursacht oxidativen Stress im Gehirn

06 > Schädigung der Hirnstrukturen durch 2,4 GHz

07 > HF-EMF Wirkung auf Neuronen

08 > 2,45 GHz verändert Leberzellstruktur

09 > HF-EMF triggert zellulären Schutzmechanismus

10 > Mechanismen der Elektrosensibilität

12 > Magnetsinn von Termiten

13 > Richtlinien EMF-Forschung

14 > EMF und Neurobiologie

NEUE PUBLIKATION 16 > Geschichte Salford-Studien

Studiendesign und Durchführung:

Nach sorgfältiger Erfassung der persönlichen Daten und Lebensgewohnheiten wurden 15 normalgewichtige junge Männer von 21 bis 29 Jahren ($23,47 \pm 0,68$ Jahre, Body Mass Index (BMI) $22,62 \pm 0,32$) 25 Minuten lang der maximalen Strahlung von 2 verschiedenen Mobiltelefonen ausgesetzt. Nachdem die Probanden 12 Stunden gefastet hatten erfolgte ein einfach verblindeter, mit Scheinbestrahlung kontrollierter Cross-Over-Vergleich. Alle Teilnehmer absolvierten 3 Tests im Abstand von mindestens 2 Wochen: Telefon 1, Telefon 2 und Scheinbestrahlung. Verwendet wurden 2 normale 900-MHz-Mobiltelefone, deren Strahlung über ein fest installiertes Headset mit SAR 0,97 bzw. 1,33 W/kg einwirkte. Die Basisstation war ein Simulator mit konstanter Übertragung. Die spontane Nahrungsaufnahme wurde mit einem Standardbuffet-Test ausgewertet und die Energie-Homöostase im Gehirn wurde mittels ^{31}P -Magnetresonanzspektroskopie bestimmt. Der Energie-Status in den Gehirnzellen wurde als Adenosintriphosphat (ATP) und Kreatinphosphat (Phosphokreatin, PCr) im Verhältnis zu anorganischem Phosphat (Pi) berechnet. Die Bestrahlung bzw. Scheinbestrahlung erfolgte mit maximaler Leistung des Mobiltelefons zunächst für 5 Minuten (um festzustellen, ob es einen sofortigen Einfluss der Strahlung auf den Stoffwechsel des Gehirns gibt), danach für 20 Minuten. Anschließend konnten die Probanden ab 8.30 Uhr 40 Minuten lang so viel essen wie sie wollten. Sie konnten nicht wahrnehmen, dass die Menge der Nahrungsmittel vor und nach der Mahlzeit gewogen wurde. Sie wussten nur, dass mit dem Experiment die Wirkung der Mobilfunkstrahlung auf den Energiestoffwechsel des Gehirns untersucht werden sollte. Um zu vermeiden, dass sie zu viel aßen, wurde ihnen gestattet, den Rest später mitzunehmen.

Weil der Appetit durch den Glucose-Stoffwechsel reguliert wird, wurden Glucose-Gehalt im Blut, Insulin und das C-Peptid im Serum bestimmt. (Das C-Peptid ist ein Spaltprodukt des Insulins und ein Faktor bei der Regulation von Glucose-Stoffwechsel und Appetit, die Red.). Die Blutproben wurden vor Beginn der Bestrahlung (Basalwerte), nach der 5-minütigen und fünfmal nach der 20-minütigen Bestrahlung genommen.

Ergebnisse:

Bei keinem der Teilnehmer zeigten die Basalwerte, die Werte nach 5-minütiger und 20-minütiger Bestrahlung in Blut und Serum signifikante Unterschiede. Erstaunlicherweise stieg bei 13 der 15 Probanden bei beiden Mobilfunkgeräten die Kalorienaufnahme hochsignifikant um 22–27 % gegenüber der Scheinbestrahlung an, hauptsächlich durch vermehrte Aufnahme von Kohlenhydraten. Bei Telefon 1 waren es $1152,2 \pm 75,1$ zu $941,6 \pm 85,2$ kcal ($p=0,001$) und beim 2. Telefon $1195,2 \pm 79,3$ kcal zu $941,6 \pm 85,2$ kcal ($p=0,001$). Am Ende gab es zwischen den

beiden Telefontypen keine signifikanten Unterschiede, auch die Bestimmung von Glucose im Blut, Insulin und C-Peptid im Serum ergab keine Unterschiede. Die Untersuchung der Nahrungsbestandteile ergab nach der Bestrahlung neben der erhöhten Aufnahme von Kohlehydraten an 2. Stelle mehr Proteine, die Fettzufuhr war als Trend nur bei Telefon 2 leicht erhöht.

Die Messungen des Energiegehaltes in den Gehirnzellen ergaben kurz nach der Bestrahlung kaum einen Unterschied zur Scheinbestrahlung, bei der die Werte über die ganze Zeit konstant blieben. Nach der 20-minütigen Bestrahlung jedoch stieg das ATP/Pi und PCr/Pi-Verhältnis stark an und erreichte bei 50 und 55 Minuten einen hochsignifikanten Anstieg unter der Mobilfunk-Bestrahlung, um dann stark abzufallen und bei 65 Minuten wieder anzusteigen.

Schlussfolgerungen:

Die Daten dieser Studie an Menschen (junge Männer) zeigen, dass Mobilfunkstrahlung von 2 verschiedenen Telefon-Typen (900 MHz) die Kalorienaufnahme um 22 % und 27 % steigert, vor allem durch erhöhte Aufnahme von Kohlenhydraten. Die Ergebnisse decken sich mit Ergebnissen der wenigen bekannten Untersuchungen an Nagetieren. Auch wenn man Ergeb-

Die Daten dieser Studie an Menschen (junge Männer) zeigen, dass Mobilfunkstrahlung die Kalorienaufnahme um mehr als 22 % steigert...

nisse nicht direkt von Tierversuchen auf den Menschen übertragen kann, weil die Nagetiere Ganzkörperbestrahlung ausgesetzt wurden und die Tiere sich außerdem bewegen, deuten diese und frühere Ergebnisse darauf hin, dass Mobilfunkstrahlung ein möglicher beitragender Faktor zu übermäßigem Essen sein kann. Andere

Untersuchungen mit Kindern und Jugendlichen ergaben ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Computer- und Mobilfunknutzung und erhöhtem BMI. Das heißt, Hochfrequenzstrahlung könnte zur epidemischen Fettleibigkeit beitragen. Die Bedingungen der Mobilfunkbestrahlung hier sind mit 25 Minuten realistisch und haben keine Wärmewirkung zur Folge.

Darüber hinaus wurden in diesem Experiment Veränderungen der Energie-Homöostase im Gehirn festgestellt. Der Anstieg des hochenergetischen Phosphatstoffwechsels nach Einwirken der Mobilfunkstrahlung könnte darauf hindeuten, dass der Glucosebedarf zur Aufrechterhaltung der Homöostase in den Nervenzellen erhöht ist. Das ergibt eine fundamentale Bedeutung für alle Hirnfunktionen, mit Einfluss auf mentale Gesundheit, Verhalten und auf weitere Organe. Mögliche Störungen durch elektromagnetische Felder könnten daher einige allgemeine neurobiologische Wirkungen haben, die noch nicht überschaubar sind. Besonders Kinder und Jugendliche sind betroffen, da sie vom Beginn ihres Lebens der Strahlung ausgesetzt sind und deren Gehirn signifikant mehr Strahlung aufnimmt, die tiefer in das Gehirn eindringt, z. B. in den Hypothalamus.

Die Studie wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. (IW)



Bestrahlung mit 2,45 GHz beeinflusst die Hodenentwicklung

Die möglicherweise schädliche Wirkung von 2,45-GHz-Strahlung auf die Hoden von im Mutterleib bestrahlten jungen Ratten

Andrašková S, Holovská K, Zuzana Ševčíková, Zuzana Andrejčáková, Štefan Tóth, Marcela Martončíková, Račeková E, Almášiová V (2022): The potential adverse effect of 2.45 GHz microwave radiation on the testes of prenatally exposed peripubertal male rats. *Histology and Histopathology*; DOI: 10.14670/HH-18-402

Im Zusammenhang mit steigender Zahl von teilweiser oder totaler Unfruchtbarkeit der Menschen im reproduktionsfähigen Alter wird dem Problem mehr Aufmerksamkeit gewidmet. Der reproduktive Prozess bei Männern ist sehr empfindlich aufgrund der großen zellulären Diversität und der organisatorischen Komplexität. Daran sind viele verschiedene Organe, Zelltypen und Moleküle beteiligt und die zeitliche und räumliche Koordination muss exakt gesteuert werden. Die Phase der Reifung der Gameten ist sehr anfällig für endo- und exogene Faktoren. Zu den exogenen Faktoren gehören auch elektromagnetische Felder, die zu Unfruchtbarkeit beitragen können. Sie können morphologische und funktionelle Änderungen im reproduktiven System hervorrufen und die männliche Keimbahn schädigen, die Spermatogenese und Spermienreifung. Das kann auch durch Geräte verursacht werden, die bei 2,45 GHz arbeiten, z. B. indem durch nicht-thermische Wirkung oxidativer Stress ausgelöst wird und reaktive Sauerstoffmoleküle (ROS) die Zellen schädigen. Das scheint ein fundamentaler Mechanismus zu sein.

Auch wenn einige Arbeiten keinen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Unfruchtbarkeit ergaben, zeigt die Mehrzahl der Arbeiten eine Vielzahl von Wirkungen (freie Radikale, Schäden an DNA und Calcium-Ionenkanälen u. a.). Darunter zeigen die meisten Studien Strukturveränderungen in Zellen und Geweben der Hoden, z. B. Degeneration, Nekrose und Apoptose der Keimzellen, verzögerte Spermatogenese, geringere Spermienproduktion einschließlich verminderte Spermienqualität.

Die Entwicklung des Ungeborenen und seiner Organe ist eine empfindliche Phase und wird in der Gebärmutter durch viele Faktoren beeinflusst. In dieser Arbeit sollte untersucht werden, wie sich 2,45-GHz-Strahlung in der Gebärmutter auf die Entwicklung der Hoden auswirkt. Das Ziel der Studie war, die Auswirkungen auf die Hoden der im Mutterleib bestrahlten Tiere zu untersuchen, besonders auf mögliche Änderungen in der Struktur, Ultrastruktur und bestimmten immunohistochemischen Parametern bei den 35 Tage alten Nachkommen bestrahlter Mütter.

Studiendesign und Durchführung:

Von den trächtigen Ratten wurden je 3 Tiere in 2 Gruppen eingeteilt für Kontroll- und Bestrahlungsgruppe. Die Bestrahlungsgruppe bekam täglich 2 Stunden gepulste Ganzkörperbestrahlung (SAR 1,73 W/kg) aus 70 cm Entfernung. Nach der Geburt lebten je 6 männliche Tiere für beide Gruppen ohne Bestrahlung bei den Muttertieren bis Tag 35. Am Tag 35 wurden die rechten Hoden der Nachkommen entnommen, Gewebeschnitte mit Hämatoxylin/Eosin gefärbt und im Lichtmikroskop untersucht. Von 60 zufällig ausgewählten runden Samenkanälchen pro Hoden wurden Durchmesser und Dicke des Epithels der Samenkanälchen gemessen.

Für die elektronenmikroskopische Untersuchung wurden die Hoden mit Toluidinblau gefärbt zur Darstellung der repräsentativen Bereiche der Samenkanälchen. Ultradünne Schnitte wurden mit Uranylacetat/Bleicitrat kontrastiert. Zur Bestimmung der degenerierten Hodenzellen wurden 5 Abschnitte der linken Hoden im Fluoreszenzmikroskop betrachtet und die FJ-C-positiven Zellen nach Signalstärke ausgewählt und die Gesamtzahl bestimmt. Um das Zellwachstum in den Hoden zu bestimmen wurden 5 histologische Schnitte pro Hoden von 40 Samenkanälchen im Stadium 7 des Epithel-Zyklus verblindet von 2 unabhängigen Histologen untersucht.

Ergebnisse:

Das Hodengewebe der Kontrolltiere zeigte im Lichtmikroskop normale Gewebestrukturen, d. h. regelrechte Samenkanälchen mit kompaktem Interstitium, Membranen mit normaler Kontur, normale Sertoli- und Leydigzellen und gut ausgebildete Blutgefäße. Dagegen sah man bei den Nachkommen der bestrahlten Tiere in den Samenkanälchen Strukturveränderungen verschiedenen Ausmaßes. In einigen Abschnitten der Samenkanälchen sah man unregelmäßige Formen und das Epithel war oft geschädigt. Der Durchmesser der Samenkanälchen war signifikant vermindert ($190,3 \pm 15,4$ zu $219,7 \pm 23,8 \mu\text{m}$) wie auch die Dicke des Epithels ($48,3 \pm 8,1$ zu $68,2 \pm 4,6 \mu\text{m}$), der interstitielle Raum war signifikant größer ($34,2 \pm 3,8$ zu $21,7 \pm 2,2 \mu\text{m}$) als bei den Kontrollen. Dazu kam Desorganisation der Keimzellen, große leere Räume zwischen den Zellbestandteilen und teilweise signifikanter Verlust von Keimzellen. Die abgeschilferten unreifen Keimzellen bildeten oft Ansammlungen in einigen Samenkanälchen mit erweitertem Lumen. Vereinzelt kam es zur Bildung riesiger vielkerniger Zellen im Epithel und man sah starke Erweiterung des Interstitiellen Raums. Die Blutgefäße zeigten normale Zellstrukturen.

Im Elektronenmikroskop war zu sehen, dass das Hodengewebe der Kontrolltiere normal angelegt ist. Das Zytoplasma der Sertolizellen enthielt gut ausgebildete Organellen, war reich an Mitochondrien und Fetttropfchen, der Zellkern war normal mit gut sichtbarem Nukleolus. Die Spermatogonien und Spermatozyten und Spermatischen waren ebenfalls gut entwickelt. In der bestrahlten Gruppe gab es Unregelmäßigkeiten in den Membra-

nen der Samenkanälchen, Vakuolen im Zytoplasma, geschädigte Organellen der Sertoli-, Keim-, Leydig-, Peritubular- und Endothelzellen zu sehen. Die Verbindungen zwischen benachbarten Sertolizellen (tight junctions) waren oft unvollständig und nekrotische Zellen kamen in den bestrahlten Geweben hochsignifikant häufiger vor als bei den Kontrollen. Die Keimzellen zeigten erhöhte Nekrotisierung und die Anzahl der wachsenden Keimzellen war vermindert. Die Degeneration der Zellen war bei den Kontrollen sporadisch, bei den bestrahlten waren die degenerierten Zellen signifikant erhöht ($p < 0,01$). Degeneriert waren hauptsächlich Spermatogonien und Spermatozyten, die ungleichmäßig im Epithel der Samenkanälchen verteilt waren. Degeneration der Spermatozyten war deutlich seltener zu sehen. Das Interstitium war nicht verändert.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse attestieren eine schädliche Wirkung der 2,45-GHz-Strahlung auf die Entwicklung von Hoden bei den Nachkommen, wenn weibliche Ratten während der Trächtigkeit der Strahlung ausgesetzt sind. Die Auswirkungen sind Beeinträchtigungen der Gewebe- und Zellstrukturen in den Samenkanälchen und somit der Spermienentwicklung und der reproduktiven Hodenfunktion bei den Nachkommen. Bestrahlung mit 2,45 GHz während der Schwangerschaft sollte vermieden oder minimiert werden. (IW)



HF-Wirkung auf Fortpflanzung

Hochfrequente Strahlung: Eine mögliche Bedrohung für die männliche Fruchtbarkeit

Yadav H, Rai U, Singh R. (2021): Radiofrequency radiation: A possible threat to male fertility. *Reprod Toxicol.* 2021;100:90-100. doi:10.1016/j.reprotox.2021.01.007

Als hochfrequente elektromagnetische Strahlung werden elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz zwischen 3 kHz und 300 GHz verstanden. Hochfrequente Strahlung wird u.a. von Radios, Fernsehern, Mobiltelefonen, WLAN-Routern, Mikrowellen sowie Radar produziert. Aktuelle wissenschaftliche Publikationen bieten Anlass zur Annahme, dass Hochfrequenz mit einer Zunahme von Gesundheitsproblemen wie z.B. Kopfschmerzen, Schlafstörungen, Verhaltensänderungen, erhöhtem Krebsrisiko sowie negativen Auswirkungen auf die männliche Fruchtbarkeit in Verbindung gebracht werden kann. Möglicherweise schädliche Folgen der hochfrequenten Strahlung auf das männ-

liche Fortpflanzungssystem wurden erstmals 1962 publiziert. Im Vergleich zu anderen Geweben könnte die Penetrationstiefe der Hochfrequenz in die Hoden größer sein, da dieses Organ weniger umliegendes Gewebe und damit Schutz aufweist. Der Einfluss von Hochfrequenz auf das männliche Fortpflanzungssystem wird in der Wissenschaft jedoch kontrovers diskutiert. Dies macht es notwendig, die aktuelle Forschungslage zum Thema Hochfrequenzstrahlung und männliche Fruchtbarkeit zu überprüfen und zu bewerten.

Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren der Übersichtsarbeit führten eine computergestützte Datenbank-Literaturrecherche nach Forschungsstudien durch, die sich mit der Wirkung von Hochfrequenzbefeldung auf männliche Reproduktionsparameter befassten. Artikel, die bis 2020 erschienen, wurden einbezogen.

Ergebnisse:

Die von den Autoren analysierten *in-vitro*-Studien beschrieben u.a. folgende biologische Wirkungen der Hochfrequenz: Beeinflussung der Spermienmotilität, DNA-Schädigungen, Abnahme der Überlebensfähigkeit der Spermien, Anstieg reaktiver Sauerstoffspezies, verminderte Testosteronausschüttung bei kultivierten Leydigzellen. Auch die *in-vivo*-Studien demonstrieren strukturelle und funktionelle Veränderungen der Spermienparameter als Konsequenz der Hochfrequenzbefeldung. Dazu zählen veränderte Morphologie der Spermien, Morphologie der Hodenkanälchen, Hodengewicht, Spermienanzahl, -überlebensfähigkeit, -motilität, -qualität sowie eine Beeinflussung der Blut-Hoden-Schranke. Auch hormonelle Veränderungen wie ein vermindertes Testosteronlevel wurden festgestellt. Bezüglich DNA-Schäden existieren widersprüchliche Aussagen. Einerseits existieren Berichte, dass kurzfristige HF-Belastung keine genomische Instabilität bewirkt, andererseits werden DNA-Einzel- sowie Doppelstrangbrüche und Bildung von Micronuclei als Auswirkung beschrieben. Eine ganze Reihe von Studien zeigt erhöhte Bildung reaktiver Sauerstoffspezies nach Befeldung. Die erhöhten ROS-Level können in DNA-Fragmentierung, Lipidperoxidation sowie Schädigung der Mitochondrienstruktur resultieren, was wiederum zu verminderter Motilität führen kann. Mechanistisch beleuchten die Autoren außerdem die Rolle des Proteinkinase-Komplexes (PKC), welcher möglicherweise eine Rolle bei der Wirkung der Hochfrequenz spielt. So wird z.B. ein Zusammenhang zwischen erhöhter ROS- und verminderter PKC-Aktivität sowie verminderter PKC-Aktivität und verminderter Spermienmotilität beschrieben. Des Weiteren wird die Auswirkung möglicherweise schützender Substanzen untersucht. Beispielsweise Melatonin, grüner Tee, Vitamin C und E scheinen positive Auswirkungen auf die Spermienparameter zu haben. Der Effekt der meisten Substanzen scheint auf ihrer antioxidativen Wirkung zu beruhen.

Schlussfolgerungen:

Insgesamt deutet die vorliegende Übersichtsarbeit auf einen möglichen Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die männliche Fruchtbarkeit hin. Eine ganze Reihe von potenziellen Auswirkungen wird aufgelistet. Die Autoren erwähnen jedoch auch mögliche Limitationen der Übersichtsarbeit, auf Grund von mangelnder Qualität der Ursprungsstudien. U.a. bei Verzerrungen epidemiologischer Studien, Studiendesign, Expositionsbedingungen sowie relevanter Variablen seien Verbesserungen notwendig, um den Zusammenhang von hochfrequenter Strahlung und männlicher Fruchtbarkeit besser bewerten zu können. (RH)

**HF-EMF verursacht oxidativen Stress im Gehirn**

Wirkung akuter Belastung mit hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung von 3500 MHz (5G) auf das Angstverhalten und den auditorischen Kortex von Meerschweinchen

Yang H, Zhang Y, Wu X, Gan P, Luo X, Zhong S, Zuo W. (2022): Effects of Acute Exposure to 3500 MHz (5G) Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Anxiety-Like Behavior and the Auditory Cortex in Guinea Pigs. *Bioelectromagnetics*. 2022;43(2):106-118. doi:10.1002/bem.22388

Eine Vielzahl von Geräten, darunter Mikrowellen, Mobiltelefone, WLAN-Router und Basisstationen produzieren hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) und beeinflussen uns dadurch tagtäglich. Obwohl das Thema in der Wissenschaft kontrovers diskutiert wird, scheint Hochfrequenz wie ein Toxin auf biologische Systeme zu wirken. Wird ein Mobiltelefon ans Ohr gehalten, so sind das Ohr und der auditorische Kortex des Gehirns am stärksten der Mobilfunkstrahlung ausgesetzt. Der auditorische Kortex wird zunehmend als wesentlicher Bestandteil des Netzwerkes von Hirnregionen verstanden, welche für Vorhersage, auditive Entscheidungsfindung sowie Lernen zuständig sind und bei der Verarbeitung komplexer akustischer Signale eine wichtige Rolle spielen. Im Gegensatz zu anderen Hirnarealen, wie z.B. dem Hypothalamus oder Hippocampus, wurden die Auswirkungen von Mobilfunk auf den auditorischen Kortex bislang wenig untersucht. Basierend auf bereits existierenden Studien stellen die Autoren der hier vorgestellten Studie die Hypothese auf, dass oxidativer Stress den grundlegenden Mechanismus für die Bioaktivität von Mobilfunkstrahlung darstellt und möglicherweise Apoptose, beeinträchtigt

Hörvermögen sowie Angstverhalten hervorrufen kann. Diese Hypothese untersuchen sie durch eine *in-vivo*-Studie an Meerschweinchen.

Studiendesign und Durchführung:

40 männliche Meerschweinchen wurden zufällig in 4 Gruppen à 10 Exemplaren eingeteilt. Diese wurden für 72 h mit 3500 MHz Hochfrequenz, bei verschiedenen Feldstärken und damit resultierenden SARs befechtet: scheinbestrahlt, 2, 4 und 10 W/kg SAR. Anschließend wurden eine Vielzahl von Analysen zur Bewertung von Angstverhalten, Hörschwelle, oxidativem Stress und Apoptose durchgeführt.

Ergebnisse:

Die Wissenschaftler konnten keine Veränderungen der Hörfunktion oder des Erkundungsverhaltens (Angstverhalten) nach Befeldung feststellen. Allerdings fanden sie eine veränderte Morphologie der Neuronen des auditorischen Kortex nach Bestrahlung. Die Autoren beschreiben leicht geschwollene Mitochondrien bei der 2 W/kg-Gruppe, während die 4 und 10 W/kg Gruppen geschwollene Mitochondrien sowie veränderte Myelinscheiden aufwiesen. Die oxidativen Stressmarker (MDA, CAT, SOD, GSH) wiesen in allen bestrahlten Gruppen im Vergleich zur scheinbestrahlten Gruppe statistisch signifikante Veränderungen mit dosisabhängigem Trend auf. Die Analyse der Apoptosemarker Cytochrom C, gesplante Caspase-3 und Caspase-9 erfolgte mittels Immunofluoreszenzmikroskopie ohne Quantifizierung. Das Fluoreszenzsignal der drei Apoptosemarker weist einen dosisabhängigen Trend auf, wobei das Signal bei der 10 W/kg-Gruppe am stärksten ist.

Dieses Resultat könnte darauf hindeuten, dass die Mobilfunkstrahlung in der Lage ist, Apoptose im auditorischen Kortex auszulösen.

Schlussfolgerungen:

Die Studie demonstriert, dass akute 3500-MHz-Hochfrequenz oxidativen Stress sowie Veränderungen der Gewebestruktur im auditorischen Kortex von Meerschweinchen hervorrufen kann, ohne jedoch Verhalten oder Hörfunktion zu beeinflussen. Der Einfluss der Mobilfunkstrahlung scheint außerdem abhängig von der Feldstärke zu sein. Die Autoren schlussfolgern des Weiteren aus ihren Ergebnissen, dass die Hochfrequenz mitochondriale Dysfunktion verursachen könnte, was zur Freisetzung von Cytochrom C und damit zur Aktivierung des intrinsischen Apoptose-Signalwegs führe. Anm. d. Redaktion: Ohne eine Quantifizierung der Immunofluoreszenzanalyse scheint dies etwas verfrüht, obwohl die Daten durchaus auf einen entsprechenden Zusammenhang hindeuten. Eine Fortführung des Experiments mit entsprechender Quantifizierung wäre aufschlussreich, um eine Apoptoseinduktion angemessen bewerten zu können. (RH)



Schädigung der Hirnstrukturen durch 2400 MHz Wirkung von 2400-MHz-Strahlung auf das Verhalten und die Hippocampus- morphologie von Mäusen

Hasan I, Jahan MR, Islam MN, Islam MR (2022): Effect of 2400 MHz mobile phone radiation exposure on the behavior and hippocampus morphology in Swiss mouse model. Saudi Journal of Biological Sciences 29 (1), 102-110; <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.063>

Es gibt viele Erkenntnisse, dass elektromagnetische Strahlung sich negativ auf die Gesundheit auswirkt. Dazu gehören neurologische und physiologische Veränderungen sowie Verhaltensänderungen bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen. Unter anderem kann oxidativer Stress Enzymaktivitäten in Zellmembranen schädigen und bis zum Zelltod führen. Von Tierversuchen weiß man, dass im Zentralen Nervensystem nach Langzeitbestrahlung Schädigungen wie verminderte Anzahlen von Pyramiden- und Purkinjezellen im Ammonshorn des Hippocampus, vermehrt dunkle Zellen, verändertes Verhalten, Konzentrations- und Gedächtnisstörungen auftreten. Bei Nagetieren wurde in Verhaltens-Experimenten (Elevated Plus-Labyrinth) wiederholt festgestellt, dass Mobilfunkfrequenzen verändertes Verhalten gegenüber unbestrahlten Kontrollen hervorrufen. Es gibt keine Langzeitstudien über die Folgen von 2400-MHz-Strahlung der 4. Generation (4G), deshalb sollte in dieser Studie die Wirkung der Mobilfunkstrahlung auf den Hippocampus und das Verhalten von Mäusen untersucht werden.

Studiendesign und Durchführung:

30 männliche Mäuse wurden in 3 Gruppen zu je 10 Tieren eingeteilt, unbestrahlte Kontrolle und 2 bestrahlte Gruppen, die 40 bzw. 60 Minuten täglich bei 2400 MHz für 60 Tage der Strahlung ausgesetzt waren. Die Bestrahlung erfolgte über 2 Monate gleichzeitig mit je einem Huawei-Telefon GR5 2017, die SAR betrug 2,7 W/kg. Die Kontrolltiere standen in einem separaten Raum. Alle Tiere konnten sich frei bewegen, um Stress zu vermeiden. In dem Bestrahlungsraum gab es keine weiteren elektrischen Geräte. Das Elevated Plus-Labyrinth war für die Verhaltensstudie in einem anderen Raum platziert. Die Temperatur wurde permanent überwacht, ebenso die gleichmäßige Bestrahlung der Mäuse in den Käfigen. Das Mobiltelefon über dem Käfig auf war auf automatische Antwort eingestellt, von einem anderen 4G-Mobilfunkgerät aus wurde das installierte Gerät angerufen, so dass gleichmäßige Strahlung gewährleistet war. Die durchschnittliche Strahlungsintensität betrug vor der Bestrahlung 530 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ und während der

Bestrahlung 738 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Die Akkus wurden ständig geladen, die Tiere jeden Tag von 10.00 Uhr bis 10.40 bzw. bis 11.00 Uhr über 60 Tage bestrahlt. Die Strahlungsbelastung der Kontrollgruppe wurde ebenfalls kontinuierlich gemessen.

Das Verhalten der Tiere wurde mit dem Elevated-Plus-Labyrinth-Test durchgeführt, einem Testverfahren, mit dem man Furcht oder Ängstlichkeit bzw. Neugier der Tiere erfassen kann, die natürlicherweise eine offene, erhöhte Umgebung bevorzugen. Häufigkeit und Dauer der Eintritte in die geschlossenen bzw. offenen Arme des Labyrinths als Maß für die Ängstlichkeit der Tiere werden gemessen. Von den 4 Armen des Labyrinths hatten 2 Arme keine, die beiden anderen 40 cm hohe Wände. Oberhalb war eine Kamera installiert, mit der die Bewegungen der Tiere aufgezeichnet wurden. Die Tiere konnten sich frei bewegen. Die geschlossenen Arme gaben den Tieren Sicherheit, der Aufenthalt in den offenen Armen belegt Erkundungsdrang. Häufiger und dauerhafter Aufenthalt im offenen Bereich ist ein Maß für geringe Ängstlichkeit. Nach dem Verhaltenstest wurde den Tieren das Gehirn entnommen, der Hippocampus gewogen und die Färbung beurteilt. Die Untersuchung von Gewebeschnitten erfolgte nach Hämatoxylin/Eosin(HE)- und Kresylviolett färbung in den Hippocampus-Regionen CA1, CA2, CA3 des Ammonshorns mit den Pyramidenzellen und im Gyrus dentatus mit den Granulazellen. Die Anzahl der Pyramidenzellen, der Granulazellen und der lebenden Nervenzellen wurde bestimmt. Degenerierte Nervenzellen wurden charakterisiert als deformierte, geschrumpfte, pyknotische und hyperchromatische Neuronen, die unklare Grenzen zwischen Zytoplasma und Zellkern hatten.

Ergebnisse:

Die Verhaltenstests ergaben signifikante Unterschiede. Bei den bestrahlten Mäusen war ein hochsignifikanter Anstieg an ängstlichem Verhalten zu beobachten. Während die Kontrolltiere sich häufig und lange im offenen Bereich aufhielten, war das bei den 40-Minuten Tieren signifikant reduziert, bei den 60-Minuten-Tieren noch viel stärker reduziert. Alle Werte waren untereinander signifikant verschieden. Bei der Aufenthaltsdauer und anderen Verhaltensweisen (Kopfsenken über den Rand des offenen Arms und Stehen auf den Hinterbeinen mit den Vorderpfoten an der Wand) gab es Signifikanz zwischen den Kontrollen und der 60-Minuten-Bestrahlung.

Die histologischen Untersuchungen zeigten zumeist hochsignifikante Unterschiede sowohl zwischen Kontroll- und Bestrahlungsgruppen als auch zwischen 40- und 60-minütiger Bestrahlung in allen 4 Regionen des Hippocampus. Die Zellzahlen nahmen drastisch ab. Man sah in den bestrahlten Gewebeschnitten viele schwarze und dunkelblaue zytoplasmatische Zellen mit geschrumpfter Morphologie und degenerativen Veränderungen. Die bestrahlten Mäuse zeigten eine signifikante Abnahme an Pyramiden- und Granulazellen im Vergleich mit der Kontrollgrup-

Bei den bestrahlten Mäusen war ein hochsignifikanter Anstieg an ängstlichem Verhalten zu beobachten.

pe, in der reguläre Formen der Pyramiden- und Granulazellen und keine dunklen Zellen auftraten. Es gab deutliche Zelldegeneration mit vielen dunklen Granulazellen im Gyrus dentatus bei der 40-Minuten-Bestrahlung. Die Pyramidenzellen in allen 3 CA-Regionen des Hippocampus zeigten nach 60 Minuten Bestrahlung viele dunkel gefärbte unregelmäßig geformte Pyramidenzellen mit kleinen dunklen Kernen im Vergleich zur 40-minütigen Bestrahlung und den Kontrolltieren. Im Gyrus dentatus hatten die Granulazellen übermäßig viele geschrumpfte und degenerierte dunkle Zellen nach 60-minütiger Bestrahlung, mehr als nach 40 Minuten. Mit der Kresylviolett färbung zeigten sich nach Bestrahlung signifikant weniger normalen Nervenzellen als bei den Kontrollen, in den Regionen CA1, CA2 und CA3 fanden sich viele pyknotische und degenerierte Zellen.

Bei der Auswertung der lebenden Zellen ergaben sich zumeist hochsignifikante Unterschiede. Die Gesamtzahl der normalen lebenden Pyramidenzellen betrug bei den Kontrolltieren für die Regionen CA1, CA2 und CA3 $36,70 \pm 1,13$; $43,50 \pm 0,98$ und $43,60 \pm 1,14$ im Hippocampus und bei den Granulazellen $64,90 \pm 1,57$ im Gyrus dentatus. Nach 40 und 60 Minuten Bestrahlung waren die Zahlen signifikant niedriger: CA1 $23,10 \pm 1,52$ bzw. $7,80 \pm 0,95$, CA2 $20,20 \pm 0,65$, bzw. $13,70 \pm 0,86$, CA3 $22,30 \pm 1,0$ bzw. $12,90 \pm 0,80$ und im Gyrus dentatus $41,20 \pm 0,99$ bzw. $31,20 \pm 1,19$. Die Anzahl der dunklen Zellen stieg an, während typische Pyramidenzellen vermindert waren.

Schlussfolgerungen:

Die Studie hat gezeigt, dass die Bestrahlung mit 2400 MHz das Verhalten der Mäuse verändert in Form von Ängstlichkeit, begleitet von neurobiologischen und zellulären Veränderungen. Die bestrahlten Tiere vermieden signifikant häufiger die offenen Bereiche des Labyrinths und waren weniger entdeckungsfreudig als die Kontrolltiere. Diese Ergebnisse zeigen, dass Langzeitbestrahlung von männlichen Mäusen mit 2400-MHz-Strahlung von Mobiltelefonen die Struktur der Hippocampuszellen negativ beeinflusst und dass besonders die Pyramidenzellen der Hippocampus-Regionen CA1, CA2 und CA3 und die Granulazellen im Gyrus dentatus geschädigt werden. Das könnte langfristig zu verminderter Leistungsfähigkeit des Gehirns und anderen Erkrankungen führen. Diese Studie kann als Anlass dienen, weitere umfassende Untersuchungen durchzuführen. (IW)



HF-EMF Wirkung auf Neuronen

1800 MHz hochfrequente elektromagnetische Befeldung beeinträchtigt das Neuritenwachstum mit einer Reduktion von Rap1-GTP in primären Hippocampus-Neuronen und Neuro2a-Zellen der Maus

Li Y, Deng P, Chen C, Ma Q, Pi H, He M, Lu Y, Gao P, Zhou C, He Z, Zhang Y, Yu Z, Zhang L. (2021): 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Irradiation Impairs Neurite Outgrowth With a Decrease in Rap1-GTP in Primary Mouse Hippocampal Neurons and Neuro2a Cells. *Front Public Heal.* 2021;9(November):1-13. doi:10.3389/fpubh.2021.771508

Die zunehmende Nutzung drahtloser Kommunikationstechnologie in der modernen Gesellschaft führt zu einer erhöhten Belastung mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF). Insbesondere die Beliebtheit von Mobiltelefonen nimmt rapide zu. So nutzen beispielsweise in Korea 90 % der 13-jährigen Teenager Mobiltelefone. Das Gehirn reagiert bekanntermaßen sehr empfindlich auf hochfrequente Strahlung. Sowohl neuronale als auch kognitive Funktionen können durch Hochfrequenzbelastung beeinflusst werden. Innerhalb des Gehirns stellt der Hippocampus, welcher mit Lernen und Gedächtnis assoziiert ist, eine der sensibelsten Regionen gegenüber Mobilfunkstrahlung dar. Primäre Hippocampusneuronen sind klassische Zellen zur Bewertung des Neuritenwachstums. Störungen im Neuritenwachstum können zu gestörten neuronalen Entwicklungen und Erkrankungen führen. Es spielt eine Schlüsselrolle bei der Bildung neuronaler Netzwerke während der Entwicklung sowie der Nervenregeneration nach Traumata bzw. Erkrankungen. Das Protein Rap1 kann die Umstrukturierung des Zytoskeletts beeinflussen und damit das Wachstum von Neuriten sowie dendritischer Dornen im Gehirn fördern. In den Neuronen Neugeborener ist Rap1 ein entscheidender Regulator bei der Bildung von Axonen. Rap1 interagiert mit Botenstoffen und wandelt extrazelluläre Reize in intrazelluläre Signale um. Dabei fungiert es als molekularer Schalter mit einer aktiven und einer inaktiven Form. Rap1 kann MEK aktivieren, was wiederum ein Schlüsselmolekül des MAPK-Signalwegs darstellt. Der Rap1-MEK-MAPK Signalweg kann die Entwicklung, Plastizität sowie das Überleben von Neuronen beeinflussen, insbesondere durch die Regulierung des Neuritenwachstums. Inwiefern Rap1 am Neuritenwachstum beteiligt ist, wenn Neuronen mit Hochfrequenz bestrahlt werden, ist jedoch unbekannt. Das Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, die Wirkung von Hochfrequenz auf das Neuritenwachstum in vitro zu untersuchen und dabei die Rolle von Rap1 zu beleuchten.

Studiendesign und Durchführung:

Diese *in-vitro*-Studie wurde an primären Hippocampusneuronen sowie Neuro2a-Zellen der Maus durchgeführt. Das Experiment wurde in einem Doppelblindansatz angelegt. Die kultivierten Zellen wurden für die Überprüfung der Überlebensfähigkeit 24, 48 und 72 h mit 1800 MHz bestrahlt. Die maximale Bestrahlungsdauer der restlichen Analysen betrug 48 h. Es wurde das sXc-1800 Bestrahlungssystem (IT'Is Foundation Zürich, Schweiz) verwendet. Die Hochfrequenzbestrahlung erfolgte im GSM-Gesprächsmodus mit einem Expositionsintervall von 5 Minuten Befeldung ein und 10 Minuten Befeldung aus. Der SAR-Wert betrug 4 W/kg. Nach der Befeldung wurde die Überlebensfähigkeit der Zellen sowie das Neuritenwachstum untersucht. Außerdem wurden verschiedene immunohistochemische, Expressions- und Aktivitätsanalysen durchgeführt.

Ergebnisse:

Die Überlebensfähigkeit der Zellen war weder bei den primären Neuronen noch den Neuro2a-Zellen nach 24–72h Befeldungsdauer eingeschränkt. Im Gegensatz dazu wurde das Neuritenwachstum (u.a. Länge der Neuriten) nach 48h Befeldung in beiden Zelltypen beeinträchtigt. Die Bildung des Proteins Rap1 wurde weder auf Gen- noch auf Proteinebene negativ durch die 48-stündige Hochfrequenzbelastung beeinflusst. Allerdings war die aktive Form des Rap1 (Rap1-GTP) in beiden Zelltypen nach Bestrahlung vermindert. Übereinstimmend damit war auch die aktive Form des „downstream“ Signalmoleküls MEK (p-MEK1/2) verringert. Um zu überprüfen, ob hier ein kausaler Zusammenhang besteht, implementierten die Wissenschaftler eine konstitutiv aktive Version des Rap1 in die Neuro2a-Zellen. Die Überexpression des aktiven Rap1 hob die Störung des Neuritenwachstums als Folge der 48h Hochfrequenzbelastung auf.

Schlussfolgerungen:

Die Autoren konnten eine Störung des Neuritenwachstums neuronaler Zellen als Konsequenz von 1800-MHz-Hochfrequenzbefeldung demonstrieren. Da die Aktivität des Rap1 Proteins in Folge der Befeldung abnahm und die konstitutiv aktive Version von Rap1 das Neuritenwachstum wiederherstellen konnte, könnte Rap1 ein potenzieller neuer Kandidat sein, wie Hochfrequenz die Gehirnentwicklung stört. Laut den Autoren wäre ein möglicher Mechanismus, dass Hochfrequenz die Rap1-Aktivität durch Rap1GAP senkt, welches in weniger aktivem MEK (p-MEK1/2) und schließlich vermindertem Neuritenwachstum resultiert. Aufgrund der entwicklungsbedingten Anfälligkeit von Kindern und Jugendlichen könne die Hochfrequenzbelastung die programmierte neuronale Entwicklung stören und damit abnormales Verhalten und Krankheiten verursachen. Der Einfluss von Hochfrequenz auf das sich entwickelnde Gehirn erfordere daher größte Aufmerksamkeit. (RH)

**2,45-GHz-Strahlung verändert die Leberzellstruktur****Wirkung elektromagnetischer Strahlung auf Struktur und Ultrastruktur der Leber von im Uterus bestrahlten Ratten**

Holovská K, Almášiová V, Andrašková S, Demčíšáková Z, Račková E, Cigánková V (2021): Effect of electromagnetic radiation on the liver structure and ultrastructure of in utero irradiated rats. *Acta Veterinaria Brno* 90 (3), 315–319; <https://doi.org/10.2754/avb202190030315>

Eine Reihe von Studien hat den Einfluss von nicht-thermischen elektromagnetischen Feldern auf morphologische Veränderungen in Gewebe und Organen erwachsener Tiere untersucht. Man konnte Veränderungen an der Zellform, den Membranen und Organellen von Zellen und der Struktur des Zellskeletts feststellen sowie Störungen auf molekularer Ebene (Ionenfluss, Ionenkanäle, Zellzyklus) nachweisen. Diese Befunde stammen von Geweben erwachsener Tiere, Daten zu Auswirkungen auf junge Tiere, die im Mutterleib bestrahlt wurden, sind wenige bekannt. Das Ziel dieser Studie war, mögliche Veränderungen im Lebergewebe von Nachkommen der weiblichen Ratten, die einer 5-wöchigen Bestrahlung bei 2,45 GHz ausgesetzt waren, festzustellen.

Studiendesign und Durchführung:

Trächtige Ratten wurden mit gepulster 2,45-GHz-Strahlung (2,8 mW/cm²) täglich 2 Stunden über die Zeit der Trächtigkeit behandelt. Weitere Tiere wurden scheinbestrahlt. Von den Nachkommen wurden je 5 männliche Tiere aus den beiden Gruppen zur weiteren Untersuchung ausgewählt. Das Lebergewebe der 5 Wochen alten Nachkommen wurde nach der Geburt histopathologisch nach Hämatoxylin-Eosin-Färbung im Lichtmikroskop auf Struktur, und nach Picro-Siriusrot-Färbung auf den Zustand des Kollagens untersucht. Die Untersuchung im Elektronenmikroskop erfolgte nach Kontrastierung mit Uranylacetat und Bleicitrat zur Begutachtung der Ultrastruktur.

Ergebnisse:

Die Auswertung im Lichtmikroskop ergab, dass die Leber der Kontrollgruppe eine normale Gestalt hatte. Die Leberzellen waren polygonal mit azidophilem Zytoplasma und runden euchromatischen Zellkernen und normal durch Sinusoide (Leberkapillaren) getrennt. Die Siriusrot-Färbung zeigte normale Architektur mit normaler Verteilung von Kollagen. In der bestrahlten Gruppe gab es keine signifikanten Veränderungen in der Struktur der Leber. Größe und Form der Leberläppchen waren regelrecht, es gab keine Entzündungszeichen und das Bindegewebe war nicht vermehrt. Die Leberzellen waren gleich

in Größe und Form und die Lebersinusoiden (Leberkapillaren) zeigten keine Erweiterungen oder Hyperämie.

Im Elektronenmikroskop sah man in der Kontrollgruppe normale Ultrastruktur der Leberzellen. Das Zytoplasma enthielt normal geformte Mitochondrien, normales Raues Endoplasmatisches Reticulum und sporadisch verteilte Fetttropfchen. Die Zellverbindungen untereinander waren klar zu erkennen. Die Zellmembranen bildeten kurze Mikrovilli, die in den Disse-Raum und die engen Gallenkanälchen (Canaliculi) hineinragten. Der Disse-Raum war getrennt von den Sinusoiden durch diskontinuierliche Endothelzellen. Das Zytoplasma der Endothelzellen enthielt einen kompakten ovalen Zellkern, Mitochondrien und Pinozytose-Vesikel. In der bestrahlten Gruppe sah man Veränderungen der Ultrastruktur in verschiedenem Ausmaß. In manchen Regionen des Leberparenchyms waren Mitochondrien und das Raue Endoplasmatisches Reticulum erhalten, in einigen Zellen waren Fetttropfchen deutlich zu erkennen. In vielen Leberzellen fanden sich viele Vesikel verschiedener Formen und Größen, einige davon waren homogen, andere enthielten kleine elektronendichte Granula. In diesen Zellen waren die Mitochondrien leicht angeschwollen und in einigen Bereichen des Parenchyms waren die Disse-Räume erweitert und unregelmäßig. Dort waren die Endothelzellen angeschwollen mit ausgedehnten Fenestrationsöffnungen und die Zellmembranen der Leberzellen verändert. Die im Disse-Raum befindlichen Mikrovilli waren verändert und ihre Anzahl vermindert. In allen Leberzellen hatten die Gallen-Canaliculi und die Mikrovilli, die in das Lumen ragten, eine intakte Morphologie.

Schlussfolgerungen:

Lebergewebe von männlichen Ratten, die im Mutterleib einer 900-MHz-Strahlung ausgesetzt waren, zeigten im Lichtmikroskop kaum Unterschiede zur Kontrollgruppe, im Elektronenmikroskop jedoch waren zahlreiche schädliche Wirkungen zu sehen. Veränderungen bei Form und Größe der Leberzellen, der Anzahl von Mikrovilli und Bildung von Vesikeln verschiedener Formen und Größe. Die Endothelzellen und Mitochondrien waren angeschwollen mit größeren Fenestrationsöffnungen im Vergleich zum Gewebe der Kontrolltiere. Die Disse-Räume waren unregelmäßig und erweitert. Frühere Experimente hatten ähnliche Ergebnisse und auch andere Forscher fanden Zellveränderungen. Auch wenn diese Veränderungen nicht sehr ausgeprägt waren, sind weitere Studien erforderlich, um das mögliche Risiko der 2,45-MHz-Strahlung auf die Schwangerschaft zu klären. (IW)



HF-EMF triggert zellulären Schutzmechanismus 900-MHz-Hochfrequenzfeld induziert die mitochondriale Antwort auf ungefaltete Proteine in Knochenmark- stammzellen der Maus

Xie W, Xu R, Fan C, Yang C, Chen H, Cao Y. (2021): 900 MHz Radiofrequency Field Induces Mitochondrial Unfolded Protein Response in Mouse Bone Marrow Stem Cells. *Front Public Heal.* 2021;9(August):1-8. doi:10.3389/fpubh.2021.724239

Nicht-ionisierende hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) sind heutzutage allgegenwärtig. Sie werden u.a. im Militär, Radio- und Fernsehübertragungen, drahtlosen Kommunikationssystemen, der Industrie sowie der Medizin eingesetzt. Obwohl das Thema in der Wissenschaft kontrovers diskutiert wird, häufen sich die Hinweise, dass hochfrequente Felder die übermäßige Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) hervorrufen können. Diese können oxidativen Stress und so negative gesundheitliche Auswirkungen verursachen. Mitochondrien sind die hauptsächliche Quelle und gleichzeitig ein Angriffspunkt von HF-induzierten ROS. HF-EMF greifen direkt die Elektronentransportkette an, was zu mitochondrialer Dysfunktion und Überproduktion von ROS führen kann. Ein lediglich leichter Anstieg von ROS kann jedoch zu zellulären Abwehrmechanismen führen, unter anderem der sogenannten „unfolded protein response“ (UPR, Reaktion auf ungefaltete Proteine). Wenn sich auf Grund von zellulärem Stress ungefaltete bzw. fehlgefaltete Proteine innerhalb der Zelle anhäufen, wird die Synthese von mitochondrialen Proteinen angeregt. Dies beinhaltet Chaperone, welche die korrekte Faltung von Proteinen unterstützen, sowie von Proteasen, die un- bzw. fehlgefaltete Proteine abbauen. Dieser Prozess wird als mitochondriale UPR bezeichnet. Dieser Schutzmechanismus kann zunächst die negativen Auswirkungen von umweltbedingtem Stress kompensieren, eine verlängerte oder dysregulierte mitochondriale UPR-Aktivierung kann jedoch die mitochondriale Fehlfunktion verschlimmern. Es ist bekannt, dass sowohl ionisierende als auch nicht-ionisierende Strahlung den JNK-Signalweg aktivieren kann. Gleichzeitig ist die Aktivierung von JNK2 mit der Induktion von UPR assoziiert. Derzeit existieren nur wenige Berichte über die Wirkung von HF-induzierten ROS auf die mitochondriale UPR. Aus diesem Grund untersuchen die Autoren der hier vorgestellten Studie die Auswirkungen von 900 MHz auf die mitochondriale UPR in vitro.

Studiendesign und Durchführung:

Diese *in-vitro*-Studie wurde an murinen Knochenmarkstammzellen (KMSC) durchgeführt. Sie wurden über 5 Tage (4h/Tag) mit 900 MHz und 120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ bestrahlt. Der resultierende maximale bzw. mittlere SAR-Wert der Bestrahlung betrug dabei 0,41 mW/kg respektive 0,25 mW/kg. Als Positivkontrollen wurden KMSC mit Röntgenstrahlung (6 Gy) belastet. Als Negativkontrollen wurden die Zellen scheinbestrahlt. Um zu untersuchen, ob der JNK-Signalweg involviert ist, wurde des Weiteren ein JNK2-siRNA-knockdown durchgeführt. Die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies sowie die Bildung von Chaperonen und Proteasen wurde 30 min, 4 h und 24 h nach Beendigung der Bestrahlung analysiert.

Ergebnisse:

Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass sowohl Hochfrequenz- als auch Röntgenstrahlung in der Lage waren, die Produktion reaktiver Sauerstoffspezies zu induzieren. Die ROS-Konzentrationen waren 30 min und 4 h nach Bestrahlung signifikant erhöht. 24 h nach der Exposition waren bei beiden Strahlungsarten die Konzentrationen wieder auf dem Level der scheinbestrahlten Kontrollen. Der ROS-Anstieg war bei der Röntgenstrahlung höher als bei der nicht-ionisierenden Hochfrequenz. Die Analysen auf Proteinebene zeigten ebenfalls 30 min und 4 h nach Hochfrequenzbefeldung einen signifikanten Anstieg der Chaperone und Proteasen. Auch diese Level normalisierten sich wieder nach 24 h. Der siRNA-knockdown von JNK2, welches sich „upstream“ des mitochondrialen UPR-Signalweges befindet, zeigte eine signifikante Reduktion der UPR-Antwort: Chaperon- und Proteasebildung waren vermindert.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Wissenschaftler weisen darauf hin, dass selbst Hochfrequenzstrahlung, welche um ein vielfaches geringer ist als die erlaubten ICNIRP Richtlinien, *in vitro* in der Lage ist ROS-Bildung zu induzieren. Des Weiteren deuten die Resultate darauf hin, dass die niedrig dosierte Hochfrequenz mitochondriale UPR als Reaktion auf Stress hervorrufen kann. Das JNK2-knockdown-Experiment kann darauf schließen lassen, dass die Hochfrequenz die mitochondriale UPR durch den JNK-Signalweg aktiviert. Der zelluläre Schutzmechanismus der mitochondrialen UPR reicht bei der geringen Leistungsdichte von 120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ aus, um die mitochondriale Homöostase wiederherzustellen. Die mitochondriale Homöostase ist für das Überleben der Zelle von größter Bedeutung (Anm. d. Redaktion). (RH)

**Mechanismen der Elektrosensibilität****Schwellenwert der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das menschliche Gehirn.**

Hinrikus, H., Lass, J., & Bachmann, M. (2021). Threshold of radiofrequency electromagnetic field effect on human brain. *International journal of radiation biology*, 97(11), 1505-1515

Menschen scheinen hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) von etwa 0,1 V/m Feldstärke, wie sie von Radio- und Fernsehsendern seit vielen Jahrzehnten abgestrahlt werden, ohne gesundheitlichen Probleme zu vertragen. In den letzten Jahrzehnten hat das Erscheinen der Mobilfunktechnologie die Situation jedoch drastisch verändert. Die Quellen von HF-EMF sind näher an die Menschen herangerückt und die Expositionswerte sind viel höher. Die aktuellen Richtlinien empfehlen Grenzwerte für den Gesundheitsschutz von bis zu 61 V/m (ICNIRP 2020). Hunderte von Studien haben biologische HF-EMF-Wirkungen bei Menschen, Tieren und Zellen bei Expositionsniveaus festgestellt, die weit unter den bestehenden Grenzwerten für den Gesundheitsschutz liegen. Die breite Anwendung von HF-EMF gibt Anlass zur Besorgnis über mögliche Folgen auf die Gesundheit. Die Auswirkungen von HF-EMF auf die bioelektrische Aktivität des Gehirns, die Kognition und das Verhalten, sind in den letzten Jahrzehnten immer wieder thematisiert worden. Die neurophysiologischen Auswirkungen auf den Menschen – insbesondere auf das menschliche Elektroenzephalogramm (EEG) – wurden in vielen experimentellen Studien festgestellt, aber die Ergebnisse sind umstritten.

Studiendesign und Durchführung:

Das vorliegende Review analysiert die Ergebnisse von veröffentlichten HF-EMF-Studien am Menschen für die 15 Jahre 2007-2021, insbesondere bezüglich des EEG und anderen Messmethoden der Gehirnaktivität oder medizinischen bildgebenden Verfahren (z.B. PET). Die EMF-Portal-Datenbank wurde für die Suche nach Veröffentlichungen verwendet. Die Qualität aller Studien wurde bewertet und die Studien mit Mängeln in den verwendeten Methoden (unzureichende Daten zur Exposition, begrenzte Anzahl von Probanden, falsche Statistiken) wurden ausgeschlossen. Schließlich wurden 76 relevante Studien für die Analyse berücksichtigt.

Ergebnisse:

In der Kategorie Ruhe-EEG wurde in 76,7 % der Studien ein Effekt gefunden (von insgesamt 30 Studien). Am häufigsten wurde von einer erhöhten Alpha-Leistung berichtet (14 Studien). Etwas weniger Studien berichteten über eine erhöhte

Beta-Leistung (6 Studien). Eine Verringerung der Alpha-Leistung wurde nur in zwei Studien verzeichnet, die Beta-Leistung war in einer Studie reduziert. Eine Zunahme der Gamma-Leistung wurde in drei Studien, der Theta-Leistung in einer Studie belegt. Erhöhte Komplexität des EEG wurde in drei Studien festgestellt. Diese Verteilung der berichteten Effekte ist offensichtlich auf die Eigenschaften des EEG im Ruhezustand zurückzuführen: bei geschlossenen Augen ist das Alpha-Band (8-12 Hz) des EEG viel stärker ausgeprägt als alle anderen Hirnströme. Daher sind die Veränderungen der Alpha-Leistung leichter nachweisbar.

In der Gruppe Schlaf-EEG und Schlafqualität fanden 41,7 % der Studien einen Effekt. Eine Positronen-Emissions-Tomographie (PET)-Studie zeigte signifikante Veränderungen des Glukosestoffwechsels im Gehirn und dessen Anstieg in der Region, die der Antenne am nächsten ist. Eine weitere PET-Studie zeigte eine reduzierte zerebrale Stoffwechselrate von Glukose in dem Bereich nahe der Antenne/des Mobiltelefons.

Die Exposition hatte keinen Einfluss auf die Aufgabenleistung (Reaktionszeit, Fehlerrate) laut psychologischen Tests.

Nur eine Studie berichtete quantitative Daten über Veränderungen bei zwei verschiedenen Expositionsniveaus. Unter dem höheren SAR-Wert 0,303 W/kg (24,5 V/m) wurden Erhöhungen in den EEG-Frequenzbändern Beta2 (157 %), Beta1 (61 %) und Alpha (68 %) festgestellt. Bei der niedrigeren SAR 0,003 W/kg (2,45 V/m) wurde nur ein Anstieg im Beta2-Frequenzband (39 %) beobachtet. Die relative Abnahme des Effekts ist recht nah an der Veränderung der Feldstärke (10-fach), jedoch nicht des SAR-Werts (100-fach).

Nach den in der vorliegenden Übersicht analysierten Studien war die niedrigste elektrische Feldstärke, bei der eine Wirkung auf das EEG nachgewiesen wurde, 2,45 V/m, was einer Leistungsdichte von 15,9 mW/m² entspricht.

Schlussfolgerungen:

Die Analysen in der aktuellen Übersichtsarbeit zeigen, dass die Veränderungen im EEG in der großen Mehrheit der Studien ähnlich sind: Anstieg der Alpha-, Beta- und Gamma-Bänder im EEG sowie eine höhere Komplexität des Signals. Ähnliche Veränderungen im EEG sind charakteristisch für depressive Störungen. Basierend auf diesen EEG-Parametern wurden die quantitativen Maßnahmen zur Erkennung von Depressionssymptomen diskutiert. Die Kausalität zwischen HF-EMF und Depression ist nicht klar. Es ist kompliziert, im Zusammenhang mit erhöhter

Nutzung von Mobiltelefonen zwischen der direkten Auswirkung von HF-EMF und psychologischen Faktoren, die manchmal sogar zu Sucht führen, zu unterscheiden.

Depressionen haben sich in den letzten Jahrzehnten zu einer häufigen psychischen Störung mit der höchsten Prävalenz bei Personen zwischen 18 und 25 Jahren (13,1 %) (NIH 2021) entwickelt. Die typischerweise in der Umwelt vorkommenden Werte von HF-EMF haben zugenommen und die Mobilfunk-Nutzung ist intensiver geworden, aber auch die Depressions-Prävalenz bei jungen Menschen im gleichen Zeitraum. Ist dies ein Zufall oder Kausalität?

Die Ergebnisse einiger Studien zeigen, dass bei gleicher HF-EMF-Exposition und gleichen Bedingungen nur ein Teil der Menschen betroffen ist. Der Anteil empfindlicher Personen variiert zwischen 13 % und 31 % je nach Modulationsfrequenz. Es ist nicht klar, ob manche Menschen gegen HF-EMF dauerhaft oder nur zeitweise resistent sind. Der Zusammenhang zwischen Resistenz und Überempfindlichkeit ist wichtig

für die Interpretation der gesundheitlichen Auswirkungen von HF-EMF. Die Ergebnisse einiger Studien deuten darauf hin, dass HF-EMF-bezogene Veränderungen im neuronalen System (EEG-Signal) viel häufiger sind als im subjektiven Verhalten, und keine Auswirkungen auf die kognitive Leistung gefunden wurden. (Um nicht vorschnell zu entwarnen, sei jedoch darauf hingewiesen, dass neue Erkenntnisse aus der Neurowissenschaft (McFadden 2021, siehe unten) sehr wohl negative Auswirkungen eines veränderten EEGs mutmaßen lassen, da das EEG vermutlich ein direkter Ausdruck des (Selbst-)Bewusstseins ist. Drogen, welche das EEG verändern, werden allgemein als bewusstseinsverändernde Substanzen bezeichnet, Anm. der Red.).

Die niedrigste Feldstärke, die einen Effekt im EEG verursacht hat, liegt nach den ausgewerteten Studien bei 2,45 V/m, was typischerweise der Feldstärke von Mobiltelefonaten (mit Gerät 20 cm vom Kopf entfernt) oder beim Arbeiten am Laptop (mit aktivem WLAN) entspricht. Künftige, groß angelegte Studien an Mensch und Tier sind erforderlich, um das Ausmaß und die Zuverlässigkeit der experimentell ermittelten Schwelle der HF-EMF-Wirkung zu bewerten. Studien mit systematischen Variationen der Expositionsniveaus (elektrische und magnetische Feldstärken, Leistungsdichte) würden dazu beitragen, das Verständnis voranzubringen. Der Hinweis, dass die durch HF-EMF verursachten EEG-Veränderungen ähnlich denen bei Depression beobachteten verlaufen, bedarf besonderer Aufmerksamkeit. (AT)

Die Analysen in der aktuellen Übersichtsarbeit zeigen, dass die Veränderungen im EEG in der großen Mehrheit der Studien ähnlich sind... Künftige, groß angelegte Studien an Mensch und Tier sind erforderlich, um das Ausmaß und die Zuverlässigkeit der experimentell ermittelten Schwelle der HF-EMF-Wirkung zu bewerten.



Magnetsinn von Termiten

Neben Cryptochrom 2 sind magnetische Partikel und der olfaktorische Co-Rezeptor wichtig für die magnetische Orientierung bei Termiten

Gao, Y., Wen, P., Cardé, R. T., Xu, H., & Huang, Q. (2021). In addition to cryptochrome 2, magnetic particles with olfactory co-receptor are important for magnetic orientation in termites. *Communications biology*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02661-6>

Viele Tierarten nutzen das Erdmagnetfeld („geomagnetic field“, GMF) zur Orientierung und Navigation. Ameisen verwenden beispielsweise die horizontale Komponente des GMF, um die Richtung des Nestes zu bestimmen. Einige Organismen sind nachweislich in der Lage, das GMF wahrzunehmen, aber der damit verbundene sensorische Mechanismus ist noch unzureichend bekannt. Die beiden wichtigsten Hypothesen zum Magnetsinn sind die Magnetithypothese und die Radikalpaarhypothese. Die Magnetit-Hypothese besagt, dass das Magnetfeld von Nanokristallen aus Magnetit (Fe_3O_4) erkannt wird, wobei die magnetische Remanenz Teil eines sensorischen Systems ist, das die Bewegung dieser Nano-Kompassnadeln im Verhältnis zum Erdmagnetfeld erfasst.

Andere Studien haben jedoch gezeigt, dass das Magnetfeld durch lichtempfindliche chemische Reaktionen wahrgenommen wird, die vom Photorezeptorprotein für blaues Licht Cryptochrom (Cry) ausgehen, welches der einzige Kandidat für einen Radikalpaar-Magnetorezeptor ist. Vor dieser Experimentalstudie war unbekannt, ob das in Termiten vorkommende Cry2 tatsächlich für die Magnetorezeption benutzt wird. In Fruchtfliegen wurde ein magnetischer Rezeptor (MagR) identifiziert, der sich mit Cry zu einem MagR/Cry-Magnetosensorkomplex verbinden kann, der als biologischer Kompass fungiert. Bekannt war, dass ähnlich wie bei Ameisen, die Fühler von Termiten Teil des Magnetsinns sind. Termiten sind vielen Ameisenarten ähnlich, und ihr Geruchssystem ist für die Orientierung und Navigation von entscheidender Bedeutung. Der Geruchs-Co-Rezeptor („odorant receptor coreceptor“, Orco) ist für die Geruchswahrnehmung und Orientierung durch Pheromone unerlässlich.

Studiendesign und Durchführung:

Um zu untersuchen, ob und wie Termiten das GMF zur Orientierung im Licht oder in der Dunkelheit wahrnehmen, testeten die Autoren zunächst die magnetische Orientierung der Termiten *R. chinensis* und *O. formosanus* unter verschiedenen Stärken und Richtungen der horizontalen Komponente des Magnetfeldes mit Hilfe eines Video-Tracking-Systems. Die Bewegungen einzelner Termiten in Petrischalen wurden per Kamera aufgezeichnet

und am PC analysiert. Es wurden sogenannte Helmholtzspulen verwendet, die in der richtigen Anordnung Bestandteile des Erdmagnetfelds durch ihr künstliches Magnetfeld völlig neutralisieren können. *O. formosanus* kann bis 100 Meter vom Nest entfernt nach Nahrung suchen, während *R. chinensis* in der Regel innerhalb von 30 Metern nach Nahrung sucht. Zweitens wurde mithilfe von RNA-Interferenz („knockdown“ der Gene) der Einfluss von Cry2, MagR und Orco auf die magnetische Orientierung der beiden Termitenarten untersucht. Drittens haben die Autoren versucht, das Vorhandensein von magnetischen Materialien wie Eisenoxid oder Magnetit in den Termiten zu bestimmen.

Ergebnisse:

Nachdem die horizontale Komponente des GMF eliminiert wurde, verschwand die Richtungspräferenz der Termiten. Die Injektion von doppelsträngiger (ds) Cry2- oder MagR-RNA führte zu einem signifikanten Rückgang des Cry2- oder MagR-mRNA-Spiegels in den Köpfen der beiden Termitenarten, was darauf hindeutet, dass die Cry2- und MagR-Gene 3 Tage nach der Injektion ausgeschaltet blieben.

Die Injektion von dsCry2 hob die Richtungspräferenz bei der Termitenarten unter weißem Licht auf, aber die mit dsMagR injizierten Termiten zeigten weiterhin Richtungspräferenz. Der Knockdown von Cry2 führte zu einem signifikanten Anstieg des Drehwinkels im Vergleich zu den Kontrolltermiten. Darüber hinaus führte die Injektion von dsMagR zu einem signifikanten Anstieg des Laufwinkels im Vergleich zur Kontrollgruppe.

Die mit dsCry2 injizierten Termiten zeigten jedoch eine Richtungspräferenz in völliger Dunkelheit, und ebenso die mit dsMagR injizierten. Das Vorhandensein von magnetischen Partikeln konnte für beide Termitenarten bestätigt werden.

Die Injektion von dsOrco reduzierte die Aktivität der Pheromonwahrnehmung bei beiden Termitenarten deutlich. Durch die Injektion von dsOrco wurde die Richtungspräferenz von beiden Arten bei weißem Licht und völliger Dunkelheit aufgehoben.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse belegen ein neuartiges Magnetorezeptionsmodell, das auf der gemeinsamen Wirkung von Radikalpaaren, Magnetitpartikel und olfaktorischem Co-Rezeptor beruht.

Termiten können das Erdmagnetfeld zur Orientierung in völliger Dunkelheit nutzen. Erwartungsgemäß hatte der Knockdown von Cryptochrom 2 keine signifikante Auswirkung auf die Richtungspräferenz in völliger Dunkelheit. (Es ist seit längerer Zeit bekannt, dass der Radikalpaarmechanismus im Cryptochrom auf die Anwesenheit von blauem oder weißem Licht angewiesen ist, Anm. der Red.). Der Knockdown von MagR hatte keine signifikante Auswirkung auf die Richtungspräferenz unter GMF, vergrößerte aber signifikant den Drehwinkel während des Laufens bei weißem Licht, was darauf hindeutet, dass MagR das Verhal-

ten von Termiten in magnetischen Feldern beeinflussen könnte. Das Orco-Gen ist an der magnetischen Orientierung sowohl bei Licht als auch bei Dunkelheit beteiligt. Eine frühere Studie hat gezeigt, dass der Geruchssinn an der nächtlichen Wanderung der Monarchfalter beteiligt ist. In dieser Studie beeinträchtigte der Knockdown von Orco bei Termiten die magnetische Orientierung bei weißem Licht und völliger Dunkelheit, was darauf hindeutet, dass Orco an der Wahrnehmung des GMF bei Termiten beteiligt ist. Orco ist an der Orientierung durch Pheromone beteiligt, und die Antennen sind das wichtigste Geruchsorgan der Insekten. Frühere Studien haben deutlich gezeigt, dass die Antennen an der Magnetorezeption des Monarchfalters beteiligt sind.

In dieser Studie schädigte das Ausschalten von Orco das olfaktorische System der Termiten und beeinträchtigte ihre magnetische Orientierung, was darauf hindeutet, dass die Antennen für die Magnetorezeption der Termiten erforderlich sein könnten. Orco ist somit am Magnetsinn sowohl bei Licht als auch bei Dunkelheit beteiligt. Zudem scheint gesichert, dass Cry2, magnetische Partikel und Orco benötigt werden, um Termiten eine normale Orientierungsfähigkeit im Erdmagnetfeld zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Termiten das Erdmagnetfeld zur Orientierung bei Licht und Dunkelheit nutzen. Die magnetische Orientierung von Termiten verschiebt sich vom Cry2-basierten Modus bei Licht auf den Magnetpartikel-basierten Modus bei Dunkelheit. Auffallend ist, dass der Pheromonrezeptor Orco an der magnetischen Orientierung der Termiten bei Licht und Dunkelheit beteiligt ist. (AT)



Richtlinien in der EMF-Forschung

Methodik zur Untersuchung der Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung auf Organismen: Technische Aspekte

Bartosova, K., Neruda, M., & Vojtech, L. (2021). Methodology of Studying Effects of Mobile Phone Radiation on Organisms: Technical Aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12642. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph182312642>

Mit der rasanten Entwicklung der drahtlosen Kommunikation nimmt die menschliche Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF), insbesondere durch Mobiltelefone, rapide zu, was zu Bedenken hinsichtlich der möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führt. Bartosova und Kollegen haben die Hauptprobleme von Experimenten zur Untersuchung der Auswirkungen von Mobiltelefonen auf die menschliche Gesundheit zusammengefasst. Es folgt eine Auflistung

der wissenschaftlichen Methoden in der EMF-Forschung, mit Verweis auf die Vorteile und Schwierigkeiten sowie Empfehlungen für die künftige Forschung, insbesondere im Hinblick auf die technischen Aspekte der Experimente.

Die biologischen Wirkungen hochfrequenter (HF) Strahlung können durch drei grundlegende Arten von Studien erforscht werden: Laborstudien *in vivo*, d.h. mit lebenden Tieren, *in vitro*, womit die Untersuchung von Zellkulturen gemeint ist, und epidemiologische Studien, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

In-vivo-Studien

Bei *in-vivo*-Studien sind folgende Probleme bekannt: die Anzahl an Versuchstieren ist oft nicht groß genug, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können. Auch ist die Übertragbarkeit der Resultate von Tierversuchen auf den Menschen problematisch. Vermutlich sind größere Tiere – wie Hasen anstelle von Ratten – angemessener, da z.B. die Schädelstärke vom Hasen vergleichbarer mit der vom Menschen ist. Bei Laborexperimenten mit lebenden Tieren können viele Faktoren wie Stress, hormonelle und saisonale Einflüsse eine Rolle spielen.

Als positive Beispiele seien hier die groß angelegten und mit viel Aufwand betriebenen NTP- und Ramazzini-Studien genannt. Hier wurden Ratten und Mäuse während zwei Jahren verschiedenen Feldstärken an simulierter GSM-Strahlung ausgesetzt, und Beweise für Karzinogenese gefunden – beschleunigtes Tumorstadium. Die Stärke beider Studien bestand darin, dass die Strahlenmenge pro Versuchstier genau bekannt war. Ein Nachteil der verwendeten Apparatur ist, dass Signalgeneratoren anstelle von den eigentlichen GSM-Endgeräten (bzw. GSM-Basisstationen) verwendet wurden. Die simulierte GSM-Strahlung ist wesentlich gleichmäßiger in der Charakteristik als reale GSM-Strahlung, welche durch starke zufällige Schwankungen gekennzeichnet ist. Es bleibt somit die Frage offen, ob die gefundenen Auswirkungen wirklich das reale Schädigungspotenzial von GSM darstellen, insbesondere da in anderen Studien, wo sowohl reale als auch simulierte GSM-Strahlung verwendet wurden, die GSM-Strahlung von Endgeräten immer als deutlich schädlicher befunden wurde, als vom Signalgenerator produzierte GSM-Strahlung.

In-vitro-Studien

Bei *in-vitro*-Studien werden in der Regel verschiedene Arten von Zellen verwendet, die in einem speziellen Behälter HF-Strahlung ausgesetzt werden. Nach der Bestrahlung werden die Schäden an den Zellen bewertet (z.B. ihre Lebensfähigkeit und DNA-Schäden). Daher stellt bei *in-vitro*-Experimenten der Vergleich oder die Reproduzierbarkeit eine Herausforderung dar. Dies ist nicht nur auf unterschiedliche Versuchsbedingungen zurückzuführen, sondern kann auch durch geringfügige Änderungen der Auswertungsmethoden verursacht werden.

Krebserregende Wirkungen werden meist durch eine Schädigung des Zellgenoms ausgelöst, und deshalb haben sich viele

Studien mit den Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf die DNA und chromosomale Strukturen befasst. Experimente zur Untersuchung der Auswirkungen hochfrequenter (HF) Strahlung unterscheiden sich in der Art der untersuchten Zellen, der Frequenz und Intensität der elektromagnetischen Strahlung, der Dauer der Exposition und den Methoden zur Bewertung der Auswirkungen der Exposition auf Zellen und DNA.

Nach Saliev et al. 2019 sind die wichtigsten Parameter die verwendete Zelllinie und die Art der Strahlung (Frequenz, aber auch Modulation und Form der Wellen). Außerdem sollten die Bedingungen in den Inkubatoren sorgfältig kontrolliert werden, da geräteeigene EMF signifikante Auswirkungen auf Zellkulturen haben können.

Dosimetrie

Die Exposition gegenüber einem gleichmäßigen elektromagnetischen Feld führt zu einer ungleichmäßigen Energieabsorption und -verteilung im Körper, weshalb ein dosimetrischer Ansatz, mit Messungen und Berechnungen, notwendig ist. Die Messung der spezifischen Energieabsorptionsrate (SAR) ist sehr komplex, da die SAR von vielen Faktoren abhängt, z. B. von der Art des Mobiltelefons, der Form und Größe des Körpers oder Körperteils, dielektrischen Eigenschaften des Gewebes, Position der Quelle, Einfluss der umgebenden Objekte und der Frequenz der elektromagnetischen Wellen.

Experimente mit verschiedenen biologischen Systemen lassen sich nur schwer vergleichen, da unterschiedliche Zellen und Organismen möglicherweise nicht auf die gleiche Weise auf elektromagnetische Strahlung reagieren. Außerdem können die technischen Aspekte des Experiments sowie die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse problematisch sein, weil die Technologien und die Dosimetrie möglicherweise außerhalb der Erfahrung der Wissenschaftler sind. Die Verwendung eines gewöhnlichen Mobiltelefons für die Experimente führt zu Problemen bei der Bewertung der Dosimetrie; daher sind die Experimente weder gut kontrolliert noch wiederholbar (das reale Mobilfunksignal hängt von vielen Faktoren ab und ist immer einzigartig für Ort und Zeit). Die Ergebnisse der veröffentlichten Experimente sind oft widersprüchlich und im gegenseitigen Vergleich nicht eindeutig.

Schlussfolgerungen:

Die Autoren betonen, dass die Dosimetrie bei Laborversuchen immer eindeutig festgelegt und eingehalten werden sollte. Dazu gehört die Verwendung einer HF-Strahlungsquelle, bei der die Frequenz, die Dauer und die Intensität der Strahlung, einschließlich der Platzierung der Strahlungsquelle, genau eingestellt und kontrolliert werden können. Um die oben genannten Kriterien - genau definierte Hochfrequenzstrahlung einerseits und unvorhersehbare Veränderungen des Signals andererseits - zu erfüllen, schlagen die Autoren die Verwendung eines Software Defined Radio (SDR)-Ansatzes vor, der für 2G, 3G, 4G und

5G verfügbar ist, anstelle eines Signalvektorgenerators oder eines handelsüblichen Handys. Der SDR-Transceiver ermöglicht die Erzeugung von HF-Signalen in wiederholbaren Szenarien in Bezug auf Timing, Modulationsverfahren, Wellenform, Sendeleistung und deren zeitliche Änderungen für verschiedene xG-Mobilfunkgenerationen, im Gegensatz zu einem Standardsignalgenerator. Um die Experimente kontrolliert wiederholen zu können, ist es notwendig, einen standardisierten Antennenadapter für die HF-Abstrahlung zu verwenden, d.h. eine Antennenstruktur für Nah-/Fern-EM-Feld. Das SDR ermöglicht die Schaffung einer neuen Basis-Transceiver-Station (2G), eines Node B (3G), eines eNode B (4G), oder gNode B (5G), die direkt mit Mobiltelefonen kommuniziert, d.h. sie kann ein echtes, unvorhersehbares Mobiltelefonsignal (d. h. ein Signal, das sich unregelmäßig und unvorhersehbar ändert) produzieren. Die Beachtung dieser Empfehlung würde zu wesentlich erhöhter Wiederholbarkeit und Aussagekraft von HF-EMF-Experimenten führen. (AT)



EMF und Neurobiologie

Der elektromagnetische Wille.

McFadden, J. (2021). The Electromagnetic Will. *NeuroSci*, 2(3), 291-304. <https://doi.org/10.3390/neurosci2030021>

Die Theorie des bewussten elektromagnetischen Informationsfeldes („conscious electromagnetic information field“, CEMI field) geht davon aus, dass der Sitz des Bewusstseins das elektromagnetische (EM) Feld des Gehirns ist, das die Informationen von Billionen feuernder Neuronen integriert. Was wir als freien Willen bezeichnen, sei sein Ergebnis. Die nachfolgend genauer beschriebene Theorie schlägt vor, dass neben der auf Materie basierenden algorithmischen Informationsverarbeitung, die entlang der neuronalen Leitungen des Gehirns erfolgt, eine ganz andere Form der Berechnung durch die Wechselwirkungen des EM-Feldes mit den Neuronen implementiert wird, welche zu motorischen Handlungen führt. Diese erleben wir als das, was wir „Wille“ nennen.

1. Geschichte der Neurobiologie

Die Idee, dass mentale Zustände die Dynamik einer Art Feld widerspiegeln, geht mindestens bis auf die Gestaltpsychologen zurück, die Anfang des 20. Jahrhunderts postulierten, dass die ganzheitlichen Eigenschaften der Wahrnehmung in einer Art Feld verwirklicht sein müssen. Die Idee geriet aus der Mode, als die neuronale Basis der Hirnfunktion entdeckt wurde, da es keine Möglichkeit zu geben schien, Felder innerhalb der diskreten

neuronalen Substruktur des Gehirns zu kodieren. Dennoch wurde die Idee einer Art von Feld als Mittel zur Erklärung des Bindungsproblems des Bewusstseins herangezogen – also die Frage, wodurch die Einheit der bewussten Erfahrung entsteht. Der Philosoph Karl Popper schlug vor, dass das Bewusstsein eine Manifestation einer Art übergreifenden Kraftfelds im Gehirn sei, das die verschiedenen bewussten Informationen, die in den verteilten Neuronen gespeichert sind, integrieren könne.

2. EEG und das Bindungsproblem

Es gibt zahlreiche Beweise für eine physische, aber immaterielle Entität im Gehirn. Die Existenz eines elektromagnetischen (EM) Feldes im Gehirn ist seit dem neunzehnten Jahrhundert bekannt und wird routinemäßig durch medizinische Messverfahren wie das Elektroenzephalogramm (EEG) nachgewiesen. EM-Felder sind physikalische Felder, die ebenso real sind wie Materie. Elektrizität und Magnetismus sind komplementäre Erscheinungsformen des Elektromagnetismus, der, obwohl er immateriell ist, eindeutig weitreichende kausale Auswirkungen auf die Materie hat.

Elektromagnetismus ist für praktisch alle Reaktionen und Mechanismen in der Chemie und Biologie verantwortlich und wird in Technologien von der Funkübertragung bis zum modernen Computer genutzt. Angesichts der Bedeutung von EM-Feldern in der Technologie ist es kaum verwunderlich, dass sie auch in der komplexesten biologischen Technologie eine Rolle spielen: im menschlichen Gehirn. Die Bewegung elektrischer Ladung erzeugt eine elektromagnetische (EM) Feldstörung oder -welle, die durch die berühmten Maxwell-Gleichungen beschrieben wird. Die Bewegung der Ionen in und aus rund 86 Milliarden Neuronen und 125 Billionen Synapsen im menschlichen Gehirn erzeugt somit das komplexeste EM-Feld im bekannten Universum, das routinemäßig mit Gehirnschann-Techniken wie EEG und MEG gemessen wird. Trotz der Tatsache, dass die Maxwell'schen Gesetze symmetrisch sind – EM-Felder, die von bewegten Ladungen erzeugt werden, beeinflussen die Bewegung bewegter Ladungen – wurden die EM-Felder des Gehirns im Allgemeinen als irrelevant für die Gehirnaktivität angesehen.

Das Interesse des Autors an den EM-Feldern des Gehirns kam auf, als dieser das Bindungsproblem betrachtete. Die Verlagerung des Substrats des Bewusstseins von der Materie des Gehirns auf sein ebenso physisches, aber immaterielles EM-Feld würde das Bindungsproblem mühelos lösen, da Felder automatisch die in ihren Quellen kodierten Informationen integrieren und dadurch binden. Wenn der Sitz des Bewusstseins ein EM-Feld ist, dann unterliegt es der Welleninterferenz. Die meisten Neuronenpaare feuern asynchron, um EM-Feldwellen zu erzeugen, deren Spitzen und Täler nicht aufeinander abgestimmt sind und sich daher durch destruktive Interferenz gegenseitig auslöschen. Synchron feuern Neuronen hingegen erzeugen EM-Felder, die sich durch konstruktive Interferenz überlagern und gegenseitig verstärken.

3. Experimentelle Bestätigung der ephaptischen (EM-Feld-) Kopplung

Viele nachfolgende Studien zeigten, dass neuronale Synchronie auch mit bewusster Wahrnehmung beim Menschen korreliert. So wurde beispielsweise festgestellt, dass die bewusste auditive Wahrnehmung mit der weiträumigen Synchronisation von Gamma-Oszillationen korreliert ist. In der CEMI-Feld-Theorie liefern EM-Felder zwar einen Input in die neuronalen/synaptischen Berechnungen, sind aber niemals allein für einen bewussten Zustand oder Output verantwortlich. Von besonderem Interesse ist die nicht-synaptische Kommunikation über elektrische Felder, die tendenziell in ephaptische Effekte (kurze Reichweite) und Feldeffekte, die eine relativ große Reichweite haben und eine große Anzahl von Neuronen einbeziehen, unterteilt werden. In der Literatur werden die Begriffe ephaptische Übertragung (oder Kopplung) und Feldübertragung jedoch beliebig verwendet, und es gibt keine scharfe Grenze zwischen ihnen. Die Rolle der ephaptischen Übertragung bei normalen Hirnfunktionen bleibt jedoch umstritten. Mehrere Experimente haben direkte Belege für die Beeinflussung der neuronalen Dynamik durch externe elektrische Felder erbracht. Die beteiligten Forscher kamen zu dem Schluss, dass ihre Studien „eine funktionelle Rolle des endogenen Feldes bei der Steuerung der physiologischen Netzwerkaktivität durch Rückkopplungsinteraktionen im Neokortex unterstützen“. Andere Forscher kamen zur Schlussfolgerung, dass „endogene Hirnaktivität unter physiologischen Bedingungen die neuronale Funktion durch Feldeffekte kausal beeinflussen kann“ und dass die daraus resultierende Synchronisation „einen wesentlichen Einfluss auf die neuronale Informationsverarbeitung und Plastizität haben kann“.

4. Schlussfolgerungen:

In ihrer jüngsten Übersicht über die ephaptische Kopplung an die endogenen EM-Felder des Gehirns stellten Neurophysiologen provokativ die Frage: „Wozu die Mühe?“, gaben aber keine Antwort. Warum sollten Neuronen, die eine präzise drahtartige neuronale synaptische Kommunikation entwickelt haben, auch die Art von Inputs akzeptieren, die Elektroingenieure als elektrische Interferenz bezeichnen und sich große Mühe geben, diese aus ihren Schaltkreisen herauszuarbeiten? Es handelt sich eindeutig um eine sehr alte Form der neuronalen Kommunikation, da sie nicht nur bei Wirbeltieren, sondern auch bei Insekten, Gliederfüßern und Weichtieren vorkommt. Die EM-Feld-Kommunikation zwischen Neuronen ist somit seit Hunderten von Millionen Jahren der natürlichen Selektion und Evolution unterworfen. Es scheint wahrscheinlich, dass EM-Feld-Interaktionen bei der neuronalen Kommunikation sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich bringen, abhängig von der Rolle und der Architektur der verschiedenen neuronalen Netzwerke. Zu den Vorteilen könnten die schnelle Signalübertragung, die Phasenkopplung auf denselben Reiz oder die schnelle Verteilung der in EM-Feldern kodierten Informationen an viele Regionen des Gehirns gehören. Ein

weiterer Vorteil könnte darin bestehen, dass das Gehirn über eine "Feldberechnung" verfügt, die manchmal auch als quantenähnliche Berechnung bezeichnet wird und mehrere Merkmale mit der Quantenberechnung gemeinsam hat, wie z. B. die im Vergleich zu digitalen Computern einfachere Implementierung mathematischer Funktionen wie Fourier-Transformationen. Der Autor schlägt vor, dass diese Form der Feldberechnung – Algorithmen im Raum und nicht in der Zeit – nur von Neuronen umgesetzt werden kann, die durch EM-Felder interagieren, und dass sie für das Bewusstsein von grundlegender Bedeutung sei.

Die Theorie der natürlichen Selektion sagt daher voraus, dass sich das Gehirn in einen EM-Feld-unempfindlichen Strom, der mit asynchron feuern und unbewussten Aktivitäten verbunden ist, und einen EM-Feld-empfindlichen Strom, der mit synchron feuern Neuronen verbunden ist, entwickeln würde. Das ist natürlich genau das, was wir im menschlichen Gehirn und wahrscheinlich in allen Gehirnen finden. Den EM-Feld-unempfindlichen Strom nennen wir unser Unterbewusstsein, welches automatische (unwillentliche) Aufgaben ausführt, wie z. B. die Koordinierung der präzisen Bewegungen unserer Lippen und Zunge, um den Klang von Wörtern zu erzeugen. Den EM-Feld-empfindlichen Strom, der freiwillige, durch unseren "Willen" gesteuerte Handlungen ausführt, nennen wir Bewusstsein. Mittlerweile existieren tragbare EEG-Sensoren im Handel, welche die willentliche visuelle Konzentration – z.B. auf eine Ecke von einem Bildschirm – in Computeranweisungen dekodieren.

Anm. d. Red.: Wenn jedoch das willentliche Steuern von Elektronik mit einem „Gedanken-Lese-Sensor“ schon jetzt möglich ist, wie weit entfernt sind wir von der Möglichkeit, von außen (durch künstliche EM-Felder) den menschlichen Willen beeinflussen zu können? In großer Macht liegt große Verantwortung. Da Auswirkungen von WLAN oder Mobilfunktelefon auf das menschliche EEG schon vielfach dokumentiert sind (siehe oben), aber bislang in typischen psychologischen Tests der Aufmerksamkeit oder des Gedächtnisses keine Auswirkungen gefunden wurden, stellt sich die Frage, was Tests der Willensstärke und Bewusstheit wohl finden würden? (AT)

Vor 20 Jahren publizierte Salford seine erste Studie zur BHS und Mikrowellenstrahlung (1). Die Forschungsgruppen fanden bei Ratten nach zweistündiger Bestrahlung mit GSM-Mobilfunkfrequenzen eine erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin-Eiweiße und als Folge Neuronenschäden. Die Hirn-schäden waren gut durch schwarze Flecken im Gehirn zu sehen.

In einem BBC-Interview erläuterte Salford die Relevanz dieser Ergebnisse: „Diese Befunde sind gut auf den Menschen übertragbar. Sie haben die gleiche Blut-Hirn-Schranke und die gleichen Neuronen ... Es gibt gute Gründe dafür, anzunehmen, dass das, was im Rattenhirn passiert, auch im menschlichen Gehirn passiert.“ So bestehe auch die Möglichkeit, dass die Strahlung der Mobiltelefone bei einigen Menschen die Alzheimersche Krankheit auslösen könne. „Was wir sagen, ist, dass Neuronen, die anfällig für die Krankheit sind, schon früher stimuliert werden.“ Weiter erklärt Salford: „Wir können nicht ausschließen, dass sich einige Jahrzehnte täglichen Handy-Gebrauchs auf eine ganze Generation von Nutzern schon im mittleren Alter negativ auswirken“ (5. Februar 2003).(2)

Die Industrie erkannte die Zeitbombe, die in diesen Ergebnissen tickt. Sie plante damals den Aufbau des Mobilfunks. Das New Yorker Portal Microwave News hat die Geschichte der Salford-Studien aufgearbeitet.(3) Es wird dargestellt, mit welchen Methoden die Industrie in Zusammenarbeit mit der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) versuchte, die Salford Ergebnisse zu widerlegen und aus der öffentlichen Debatte herauszuhalten. Völlig zu Unrecht gerieten die Salford-Studien, die durch weitere Studien bestätigt wurden, in Vergessenheit. Das Buch von Persson macht ihre aktuelle Bedeutung klar: schon Kinder nutzen heute diese Geräte intensiv.

(1) Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BR (2003): Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect* 2003; 111 (7): 881-3

(2) Mobile phones 'may trigger Alzheimer's'; 5.2.2003, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/2728149.stm>

(3) Louis Slesin (2022): Abandoning Inconvenient Science . How RF Research on the Blood-Brain Barrier Was Shut Down – Again. Reflections on Leif Salford's 80th Birthday. <https://www.microwavenews.com/news-center/abandoning-inconvenient-science>

Neue Publikation

Mikrowellenstrahlung und Blut-Hirn-Schranke

Zum 80. Geburtstag von Prof. Leif Salford (Universität Lund, Schweden), erschien von seinem Mitarbeiter Prof. Bertil R.R. Persson das Buch „„More Probably than Unlikely“-A Tale of the Blood-Brain Barrier and Mobile Communication. Dedicated to Leif. G. Salford on his 80th birth da, 2021-12-07“. Es stellt die Relevanz der Studien zur Einwirkung von Mikrowellenstrahlung auf die Blut-Hirn-Schranke (BHS) und die wissenschaftliche Debatte, die sie auslösten, aus erster Hand dar.

