

# ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer  
Felder für Umwelt und Gesundheit



## Hochfrequenzwirkung

### Kontinuierliche 915-MHz-Strahlung verändert das Wachstum von Pflanzen

Surducu V, Surducu E, Neamtu C, Mot AC, Ciorita A (2020): Effects of Long-Term Exposure to Low-Power 915 MHz Unmodulated Radiation of Phaseolus vulgaris L. Bioelectromagnetics 41 (3), 200-212

In den nächsten 10 Jahren wird ein Anstieg der Strahlung um mehr als das 30-Fache erwartet, wodurch auch die Auswirkungen auf Lebewesen ansteigen werden. Für den Menschen haben IARC (2013) und EUROPAEM (2016) neue Richtlinien herausgegeben, die Gesundheitsprobleme beim Menschen vermindern sollen. Pflanzen reagieren sehr empfindlich schon bei geringen Feldstärken mit oxidativem Stress und veränderter Genexpression. In früheren Experimenten mit der Gartenbohne (Grüne Bohne, Phaseolus vulgaris) war gepulste Strahlung (2,45 GHz und 915 MHz) verwendet worden. Die bestrahlten Pflanzen keimten und wuchsen schneller als die Kontrollpflanzen. Das jetzige Experiment mit der Gartenbohne wurde mit kontinuierlicher 915-MHz-Strahlung geringer Feldstärke (unmodulierte Trägerfrequenz wie sie in der normalen Umgebung vorzufinden ist) über die gesamte Lebenszeit der Pflanzen durchgeführt. Durch Verwendung nur der Trägerfrequenz werden Schwankungen in der Feldstärke vermieden. Geklärt werden sollte, ob Unterschiede im Wachstum auftreten, denn Pflanzen können sich besser anpassen und möglicherweise treten geringere Unterschiede auf. Untersucht wurden Wachstumsparameter, Inhaltsstoffe, morphologische und physiologische Eigenschaften.

#### Studiendesign und Durchführung:

Die Pflanzen wuchsen in 2 getrennten abgeschirmten Räumen innerhalb einer Umgebung auf, die der eines Gewächshauses ähnelt. 36 Samen pro Gefäß wurden im Frühjahr ausgesät, je 3 Gefäße in jedem Raum platziert. Jedes Gefäß enthielt 6 Metallpole als Antennen. Die 36 Pflanzen pro Gefäß in den 3 Gefäßen in jedem Raum waren gleichmäßig um die 6 Pole verteilt, die Pflanzen wuchsen 120 Tage lang bis 220 cm vom

#### Impressum

ElektrosmogReport 2/2020, 26. Jahrgang  
Online Veröffentlichung auf [www.EMFData.org](http://www.EMFData.org)  
Bestellung Printausgabe:  
[shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport](http://shop.diagnose-funk.org/Elektrosmogreport), Bestellnr. 52002

#### Redaktion ElektrosmogReport

Dipl. Biol. Isabel Wilke (IW), Roman Heeren (RH), B.Sc.  
Kontakt: [emf@katalyse.de](mailto: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](mailto:kontakt@diagnose-funk.de)

#### Spendenkonto:

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

## INHALTSVERZEICHNIS

- WISSENSCHAFT SEITE 01** > Kontinuierliche 915-MHz-Strahlung verändert das Wachstum von Pflanzen
- 
- 03** > Wirkung von Mobilfunkstrahlung auf oxidativen Stress, Entzündungsreaktion und kontextabhängiges Angstgedächtnis bei Wistar-Ratten
- 
- 04** > Elektromagnetische Felder können über eine Calcineurin-Hemmung die Immunität unterdrücken und dadurch das Risiko für opportunistische Infektionen erhöhen: Vorstellbare Wirkungsmechanismen
- 
- 05** > Oxidativer Stress, entzündliche Prozesse und Krebs: Wie sind sie miteinander verbunden?
- 
- 06** > Mögliche Mechanismen der Orientierung am Magnetfeld
- 
- 08** > Symptome und Mechanismen der Elektrohypersensibilität
- 
- 09** > Forschung zu Genschäden durch MRI-Untersuchungen ist unzureichend
- 
- 11** > Niederfrequente elektrische Felder vermindern die Stressreaktionen bei Mäusen, sichtbar an Glucocorticoid-Konzentrationen im Blutplasma

Frühling bis zum Sommer. Das Wachstum wurde alle 30 Minuten aufgezeichnet. Die Bestrahlung erfolgte von der Einsaat bis zur Reife, in der einen Kammer mit einem Generator, die andere Kammer wurde scheinbestrahlt. Die Frequenz lag zwischen Uplink und Downlink des 900-MHz-Bandes des Mobilfunks ( $915 \pm 5$  MHz). Die Leistungsflussdichte betrug zwischen 4 und 10 mW/cm<sup>2</sup>, einer normalen Verteilung der Feldstärken. Analysiert wurden die Gehalte an Chlorophyll und Carotinoiden in gesunden Blättern am Tag 35; Größe und Anzahl der Blüten wurden ständig gemessen und das Trockengewicht von Spross und Wurzel am Ende bestimmt. Morphologie und Ultrastruktur der Blätter wurden am Tag 105 aus 30, 50 und 80 cm Höhe der Pflanzen im Licht- bzw. Elektronenmikroskop ausgewertet.

### Ergebnisse:

Man fand signifikante Unterschiede in Wachstumshöhe, Anzahl der Blüten, Gehalten an Chlorophyll und Carotinoiden sowie Änderungen der Ultrastruktur der Zellen in den Blättern. Die bestrahlten Pflanzen waren am Ende durchschnittlich 19 % höher, der prozentuale Unterschied war an Tag 26 am größten und verringerte sich bis zum Tag 35. Die Anzahl der Blüten war bei den bestrahlten Pflanzen 18 % geringer als bei den Kontrollen. Bei der Trockenmasse betrug der Anstieg 20 % bei Stängeln und Blättern ( $191,3 \pm 7,6$  g gegenüber  $153 \pm 6,1$  g). Man sah extrem lange Wurzeln mit 34 % mehr Trockenmasse, wohl bedingt durch die übermäßige Entwicklung der bestrahlten Pflanzen. Die am meisten beeinflussten Blätter waren solche, die höherer Feldbelastung ausgesetzt waren (in der Mitte der Behälter). Das deutet darauf hin, dass die Schäden von der Intensität der Strahlung abhängen.

Chlorophyll- und Carotinoid-Gehalte insgesamt unterschieden sich nicht-signifikant in den Blättern, allerdings waren die beiden Chlorophylle a und b anders verteilt. Normalerweise ist Chlorophyll a immer höher als b, bei Stress wie Trockenheit, Schwermetallbelastung im Boden, Stickstoffmangel u. a. verschiebt sich das Verhältnis. Das Verhältnis war hier signifikant verschieden, der Stressfaktor kann hier die Strahlung sein. Auch weitere sekundäre Stoffe wie Polyphenole, Phenolsäuren, Terpenoide, Alkaloide oder schwefelhaltige Inhaltsstoffe, die hauptsächlich im UV-Bereich absorbieren, unterschieden sich in den beiden Gruppen.

Im Lichtmikroskop waren morphologische Unterschiede in den Blättern zu sehen: die Anzahl der Trichome (Trichome sind die „Haare“ auf der Oberfläche von Blättern und Stängeln, die Red.) war kaum verschieden zwischen bestrahlten und unbestrahlten Pflanzen (2 %), aber in den bestrahlten Pflanzen waren sie 2–5-mal länger und es gab verzweigte Varianten. Die signifikant längeren Trichome hatten  $602,5 \pm 40,3$  µm gegenüber den Kontrollen mit  $347,7 \pm 70,2$  µm und sie lagen dichter (Abstand 300–400 µm bzw. 600–700 µm) entlang des Zentralgefäßes und auch an den sekundären Gefäßen ( $12 \pm 1$  bzw.  $7 \pm 1$ ). Dies ist auch ein Zeichen für Belastung, denn Vermeh-

rung von Trichomen ist eine Reaktion der Blätter auf schädliche Einflüsse.

Die gesammelten Blätter von den unterschiedlichen Höhen der Pflanzen (30, 50 und 80 cm) zeigten im Elektronenmikroskop normale Chloroplasten mit intakten Membranen und normale Zellwände (Ultrastruktur) bei den Kontrollpflanzen. Bei den bestrahlten Pflanzen sah man bei 30 und 50 cm unregelmäßige Zellen im Vergleich zu den Kontrollen, die Zellwände waren wellig und unterbrochen, die Chloroplasten kugelig mit Brüchen in der Umhüllung. Bei 80 cm gab es große Vakuolen, die alle Organellen an die Zellwand drückten, und die Chloroplasten waren kugelig mit hohem Gehalt an Plastoglobuli (das sind Speicher für Lipide, darin z. B. Vitamin E, Plastochinone und Xanthophylle, die zur Entwicklung der Thylakoide benötigt werden). Das Verhältnis von Zytoplasma zu Anzahl der Vakuolen war bei 30 cm 1 %, bei 50 und 80 cm stieg es auf 36 %. Die Risse entlang der Hülle der kugeligen Chloroplasten können durch Hitze, Alterung der Blätter, Bodenverseuchung oder Strahlung entstehen. Die vermehrt vorhandenen Plastoglobuli in den kugeligen Chloroplasten in den Blättern der bestrahlten Pflanzen sind ein Zeichen für oxidativen Stress.

### Schlussfolgerungen:

Alle Ergebnisse deuten darauf hin, dass die mit kontinuierlicher (unmodulierter) 915-MHz-Strahlung behandelten Pflanzen an signifikanten morphologischen und ultrastrukturellen Veränderungen litten. Nach konstanter Langzeitbestrahlung (von der Aussaat bis zur Reife) zeigte sich oxidativer Stress, die entstandenen übergroßen Vakuolen reduzierten die Menge des Zytoplasmas und Organellen. Als Folge entwickelten die Pflanzen Umwege (alternative Wege) zur Erhaltung der Lebensfunktionen, vor allem durch Vermehrung ihrer oberirdischen Teile, bestätigt durch die höhere Trockenmasse von Stängeln und Blättern bei den bestrahlten Pflanzen im Vergleich mit den Kontrollen. Das massive Wurzelwachstum bei den bestrahlten Pflanzen war eine Reaktion nicht nur auf erhöhte physiologische Bedürfnisse einer größeren Pflanze, sondern auch auf die Strahlung, die durch das Wurzelsystem der Pflanzen in den Boden floss, und die Pflanze reagierte mit Anpassung.

Das Experiment wurde mit einem festen unmodulierten Trägerfrequenzsignal durchgeführt. Da das Trägersignal in fast allen modulierten Kommunikationsmethoden genutzt wird, stellt sich die Frage: Welcher Anteil eines modulierten Signals beeinflusst die biologische Reaktion der Pflanze mehr? Nach Meinung der Forscher hat das digitale Informationssignal die spezifischeren biologischen Wirkungen und ist damit möglicherweise schädlicher. Weitere Experimente sollten die biochemischen Ursachen klären. Die Entwicklung in Richtung 5G und 6G mit ihrer steigenden Strahlungsenergie für die ausge dehnte Bandbreite bedeutet mehr Besorgnis in Bezug auf die Wirkung der nicht-ionisierenden Strahlung auf biologische Systeme. (IW)



## Mobilfunkwirkung auf Gehirn, Hormonhaushalt und Verhalten

### Wirkung von Mobilfunkstrahlung auf oxidativen Stress, Entzündungsreaktion und kontextabhängiges Angstgedächtnis bei Wistar-Ratten

Singh KV, Gautam R, Meena R, Nirala JP, Jha SK, Rajamani P (2020): Effect of mobile phone radiation on oxidative stress, inflammatory response, and contextual fear memory in Wistar rat Environmental Science and Pollution Research. 2020. doi:10.1007/s11356-020-07916-z

Gegenwärtig sind wir kontinuierlich der Strahlung hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF) ausgesetzt, welche hauptsächlich durch Mobiltelefone erzeugt werden. Obwohl die ausgesendete Strahlung von Mobiltelefonen weit unterhalb der Intensität ist, um thermische Auswirkungen zu haben, hat die wissenschaftliche Literatur in der jüngsten Zeit demonstriert, dass eine langfristige Belastung mit dieser Strahlung Schädigungen auf nicht-thermischen Wege verursachen kann. Reaktive Sauerstoffspezies (ROS) und deren Auswirkungen sind momentan die überzeugendsten Mechanismen um nicht-thermische Wirkungen von HF-EMF, insbesondere im Falle des Gehirns, zu erklären. Innerhalb des Gehirns stellt der Hippocampus eine für Hochfrequenzstrahlung besonders anfällige Region dar. Er spielt eine wichtige Rolle in der Regulation der HHN (Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden) -Achse, der Regulation des Immunsystems sowie der Kontrolle von stressbedingten Verhaltensweisen. Bei der HHN-Achse handelt es sich um ein komplexes Zusammenspiel von direkten und rückgekoppelten Einflüssen zwischen den drei Hormondrüsen. Diese drei Hormondrüsen kontrollieren mit ihrer Interaktion eine Reihe von wichtigen Körperprozessen, wie z.B. die Reaktion auf Stress, Verdauung, Immunsystem und Stimmung bzw. Emotionen. Eine Dysregulierung der HHN-Achse wird primär durch einen veränderten Gehalt an Glucocorticoiden aufgezeigt. Glucocorticoide sind eine Klasse von Steroidhormonen, welche in der Nebennierenrinde gebildet werden. Bei den Stresshormonen Cortisol und Cortison handelt es sich beispielsweise um Glucocorticoide.

Wie so oft im Kontext von Hochfrequenzstrahlung existiert keine eindeutige Studienlage für die Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung auf Glucocorticoide. Wenige Studien weisen darauf hin, dass Hochfrequenzstrahlung die Konzentration von Glucocorticoiden erhöhen kann, andere finden keine Wir-

kung. Erhöhte Konzentrationen von Glucocorticoiden spielen eine Rolle in der Regulierung der Immunantwort und der Produktion von sogenannten „proinflammatorischen“ Cytokinen. Es gibt mehrere Studien, welche eine direkte Auswirkung von Hochfrequenzstrahlung auf die Konzentrationen „proinflammatorischer“ Cytokine bestätigen. „Proinflammatorische“ bzw. entzündungsfördernde Cytokine sind Proteine, welche maßgeblich an Immunreaktion und Entzündungsreaktion beteiligt sind. In Anwesenheit von Antigenen (z.B. Viren und Bakterien) werden Cytokine von verschiedenen Zellen gebildet und führen zu lokalen und systemischen Auswirkungen (z.B. Fieber, stärkere Durchblutung, Erweiterung von Blutgefäßen, Aktivierung des Immunsystems). Die drei beschriebenen Faktoren (oxidativer Stress, Dysregulation der HHN-Achse und Cytokinreaktion) spielen eine Rolle bei der hippocampusabhängigen angstbezogenen Erinnerung. Das Ziel der hier vorgestellten Studie war es zu untersuchen, ob eine langfristige (16 Wochen) Belastung mit Mobilfunkstrahlung oxidativen Stress, Entzündungsreaktionen sowie Desregulierung der HHN-Achse im Hippocampus verursacht und das Angstgedächtnis von Ratten beeinflusst.

#### Studiendesign und Durchführung:

Die Versuche wurden an 6 Wochen alten, männlichen Wistar-Ratten durchgeführt. Insgesamt 12 Versuchstiere wurden in zwei Gruppen unterteilt: bestrahlt und scheinbestrahlt. Als Strahlungsquelle diente ein 3G (UMTS, 1915 MHz) Samsung Mobiltelefon welches einen Videoanruf empfangt. Die gemessene Frequenz und Energiedichte innerhalb des Bestrahlungskäfigs betrug 1966,1 MHz respektive 4,0 mW/cm<sup>2</sup>. Bei ausgeschaltetem Mobiltelefon (scheinbestrahlte Gruppe) betrug die Energiedichte 0,00001 mW/cm<sup>2</sup>. Der errechnete Ganzkörper SAR-Wert war 0,36 W/kg. Nach der Bestrahlungsperiode wurden die Versuchstiere eines kontextabhängigen Angstkonditionierungstests unterzogen. Anschließend wurden die Tiere eingeschläfert und die biochemischen Analysen im Gewebe durchgeführt. Es erfolgte eine Untersuchung von oxidativen Stressmarkern, proinflammatorischen Cytokinen und Stresshormonen.

#### Ergebnisse:

Zunächst stellte die Arbeitsgruppe fest, dass das Körper- und Gehirngewicht der bestrahlten Tiere im Vergleich zu den scheinbestrahlten Tieren unverändert war. Die Konzentration von reaktiven Sauerstoffspezies im Hippocampus war bei den bestrahlten Tieren um 80% erhöht. Auch die Konzentrationen von peroxidierten Lipiden und von oxidierten Proteinen waren signifikant erhöht. Übereinstimmend damit war die antioxidative Kapazität des Hippocampus signifikant vermindert. Die

## Mobilfunkstrahlung scheint in der Lage, oxidativen Stress im Gehirn hervorzurufen.

Konzentrationen der drei gemessenen proinflammatorischen Cytokine (IL-1beta, IL-6 und TNF-alpha) waren im Serum der bestrahlten Tiere signifikant erhöht. Die Untersuchung der zwei Stresshormone ACTH und CORT (Glucocorticoide) ergab eine signifikante Konzentrationssteigerung von 58% bzw. 20%. Außerdem verursachte die Mobilfunkstrahlung eine signifikante, übermäßige Vergrößerung (Hypertrophie) der Nebennierenrinde. Dies weist auf eine hormonelle Reaktion bzw. eine chronische Dysregulation der HHN-Achse als Folge der Mobilfunkstrahlung hin. Die Arbeitsgruppe konnte allerdings keine Beeinträchtigung des kontextbezogenen Angstgedächtnisses auf Grund der Bestrahlung feststellen.

### Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Autoren bezüglich des oxidativen Stresses im Gehirn stimmen mit einer Reihe von Studien überein: Mobilfunkstrahlung scheint in der Lage, oxidativen Stress im Gehirn hervorzurufen. Die Veränderungen in den oxidativen Stressmarkern seien allerdings abhängig von Dauer und Dosis der Belastung sowie den experimentellen Bedingungen. Die Studie deutet auch darauf hin, dass Mobilfunkstrahlung eine frühe Immunantwort auslöst. Bei den untersuchten Cytokinen, welche allesamt erhöht waren, handelt es sich um Marker der angeborenen Immunantwort. Sie werden von aktivierten Immunzellen wie Makrophagen, Fibroblasten und Endothelzellen unmittelbar nach der Belastung mit diversen Umweltfaktoren ausgeschüttet. Abgesehen davon legen die Ergebnisse der Autoren eine Dysregulierung der HHN-Achse nahe. Diese Dysregulierung spiegelt sich in erhöhten Konzentrationen von Stresshormonen (Glucocorticoiden), sowie einer übermäßigen Vergrößerung der Nebennierenrinde wieder. Es ist bekannt, dass Glucocorticoide eine unterdrückende Wirkung auf das Immunsystem besitzen und somit entzündungsfördernde Cytokine herunterregulieren. Dies steht in scheinbarem Widerspruch zu den erhöhten Konzentrationen der Cytokine, welche die Wissenschaftler beobachten konnten. Die Autoren erklären diesen scheinbaren Widerspruch dadurch, dass eine langfristige Belastung mit Mobilfunkstrahlung eine Ermüdung der HHN-Achse sowie eine Glucocorticoidrezeptor-Resistenz verursachen kann. Die gestörte Regulation der Glucocorticoide kann zu einer erhöhten Intensität und Dauer der Immunantwort führen. Die Arbeitsgruppe mutmaßt, dass das unveränderte Gedächtnis der Versuchstiere auf ein komplexes Zusammenspiel gegensätzlicher Auswirkungen von Glucocorticoiden und den proinflammatorischen Cytokinen zurückzuführen ist. Außerdem sei es möglich, dass ein auf Grund der Dauer der Belastung mit Mobilfunk eine Anpassungsreaktion der Tiere stattgefunden habe, welcher der Grund für das unbeeinträchtigte Gedächtnis sei. (RH)



### EMF-Wirkung auf das Immunsystem

## Elektromagnetische Felder können über eine Calcineurin-Hemmung die Immunität unterdrücken und dadurch das Risiko für opportunistische Infektionen erhöhen: Vorstellbare Wirkungsmechanismen

Doyon PR, Johansson O. (2017): Electromagnetic fields may act via calcineurin inhibition to suppress immunity, thereby increasing risk for opportunistic infection: Conceivable mechanisms of action. *Medical Hypotheses*. 2017;106:71-87. doi:10.1016/j.mehy.2017.06.028

In den vergangenen 30 Jahren gab es eine erhebliche Zunahme an zuvor seltenen Krankheiten und funktionellen Beeinträchtigungen, wie z.B. Autismus-Spektrum-Störung, Chronisches Müdigkeitssyndrom oder Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung. Viele von diesen Syndromen gehen mit einem geschwächten Immunsystem bzw. Störungen des Immunsystems (Allergien, Lebensmittelunverträglichkeiten, Autoimmunerkrankungen etc.) einher. Zeitgleich gab es einen starken Anstieg von durch Menschen verursachte elektromagnetische Felder (EMF). Außerdem verknüpfen eine Reihe von experimentellen und epidemiologischen Studien die Belastung mit elektromagnetischer Strahlung, mit vielen dieser Krankheitszustände, ihren Störungen im Immunsystem und ihren Symptomen. Ein möglicher Weg, wie elektromagnetische Felder das Immunsystem beeinflussen könnten, wäre über  $Ca^{2+}$ -Signalkaskaden und das Enzym Calcineurin. Bei Calcineurin handelt es sich um eine Serin-Threonin-Phosphatase, die in einer Reihe von Geweben mit lebenswichtigen Funktionen wie z.B. Nerven, Herz, Skelett und Muskel vorkommt. Calcineurin spielt eine zentrale Rolle bei der Immunantwort und ist bei einer Vielzahl von Signalwegen beteiligt, die mit der zellulären Entwicklung zusammenhängen. Bezüglich des Immunsystems ist Calcineurin entscheidend an der Aktivierung, Zellteilung und Differenzierung von T-Lymphozyten beteiligt. Transplantatempfängern werden Calcineurininhibitoren verabreicht, um das Immunsystem zu unterdrücken und eine Organabstoßung zu verhindern. Dies hat die Nebenwirkung, dass die Empfänger leichter an sog. opportunistischen Infektionen, wie z.B. Pilz/Hefe-, Virus- und atypischen Bakterieninfektionen erkranken. Es gibt Hinweise darauf, dass Calcineurininhibitoren über die Erhöhung von oxidativem Stress wirken. Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass elektromagnetische Felder, in Abhängigkeit von einer Reihe von Faktoren, eine stimulierende, hemmende oder gar keine Wirkung auf die Calcineurinaktivi-

tät haben können. Ein möglicher Mechanismus, wie eine hemmende Wirkung zu Stande kommen könnte, wäre eine pathologische Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS, Reactive Oxygen Species).

### Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren analysierten wissenschaftliche Literatur.

### Ergebnisse:

Diverse Studien zeigen, dass niederfrequente elektromagnetische Felder einen  $\text{Ca}^{2+}$ -Einstrom, durch die Öffnung von spannungsabhängigen Kalziumkanälen verursachen können. Dies passiert allerdings nur bei bestimmten Frequenzen und Feldstärken. Es ist bekannt, dass die Aktivierung von T-Lymphozyten unter anderem mit einem Zustrom von  $\text{Ca}^{2+}$  verknüpft ist. Ein übermäßiger, pathologischer Einstrom von  $\text{Ca}^{2+}$  könnte jedoch zu der übermäßigen Produktion von ROS führen, welche wiederum Calcineurin hemmen und so die Immunantwort abschwächen. Es konnte experimentell demonstriert werden, dass ROS eine starke hemmende Wirkung auf Calcineurin besitzen. Eine Vielzahl von Studien zeigen nicht-thermische Wirkungen von elektromagnetischen Feldern auf das Immunsystem. Diese Wirkungen betreffen unter anderem immunspezifische Organe, angeborene und adaptive Immunzellaktivität, Antikörper, Autoimmunsystem und Empfindlichkeit gegenüber Nahrungsmitteln. Viele dieser Studien finden diese Wirkungen allerdings bei kurzzeitigen Belastungen mit Leistungsdichten, die um ein Vielfaches stärker sind als die, welchen Menschen im Alltag ausgesetzt sind. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass die langfristige Belastung mit niedrigeren Leistungsdichten, welcher ein Großteil der Menschheit ausgesetzt sind, eine ähnliche Auswirkung haben könnte. Bei Menschen, die aus beruflichen Gründen mit elektromagnetischen Feldern belastet sind, existieren ebenfalls Wirkungen auf das Immunsystem. Unter anderem werden Verringerungen der Gesamtlymphozytenzahl, der T-Lymphozytenzahl sowie diverser biologischer Marker (CD4, CD3, Interferon gamma, ODC Aktivität und Anzahl an NK-Zellen) beschrieben.

### Schlussfolgerungen:

Viele Studien zeigen, dass elektromagnetische Felder Auswirkungen auf das Immunsystem haben können. Es gibt Hinweise darauf, dass Calcineurininhibitoren ihre hemmende Wirkung durch die Stimulierung von ROS-Produktion verursachen. Es ist bekannt, dass auch elektromagnetische Felder ROS generieren. Des Weiteren wurde in einer Reihe von Studien demonstriert, dass ROS Calcineurin hemmen. Daher stellen die Autoren die Hypothese auf, dass EMF Calcineurin indirekt hemmen. Dies geschehe durch eine übermäßige ROS-Produktion als Folge eines pathologischen Kalziumzustroms in die Zelle und mache den Körper zunehmend anfällig für Infektionen. (RH)



### Review: ROS-Wirkung auf Krebs

## Oxidativer Stress, entzündliche Prozesse und Krebs: Wie sind sie miteinander verbunden?

Reuter S, Gupta SC, Chaturvedi MM, Aggarwal BB (2011): Oxidative stress, inflammation, and cancer: How are they linked? *Free Radical Biology & Medicine* 2011;49(11):1603-1616. doi:10.1016/

Oxidativer Stress ist definiert als ein Ungleichgewicht zwischen der Produktion freier Radikale, sogenannter Oxidantien oder reaktive Sauerstoffspezies (ROS), und deren Beseitigung durch Schutzmechanismen, die als Antioxidantien bezeichnet werden. Dieses Ungleichgewicht führt zu Schädigungen wichtiger Biomoleküle und Zellen, mit möglichen Auswirkungen auf den gesamten Organismus. ROS sind allerdings normale Produkte des zellulären Stoffwechsels und spielen eine wichtige Rolle bei der Stimulation von Signalwegen als Reaktion auf Umwelteinflüsse. Die meisten ROS werden in Zellen durch die mitochondriale Atmungskette erzeugt. Von aeroben Zellen produzierte ROS sind z.B. das Superoxid-Anion ( $\text{O}_2^-$ ), Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), das Hydroxylradikal ( $\text{OH}\cdot$ ) und organische Peroxide. Bei Sauerstoffmangel erzeugt die mitochondriale Atmungskette auch Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ), welches wiederum reaktive Stickstoffspezies (RNS) erzeugen kann. Proteine und Lipide werden oftmals durch ROS und RNS angegriffen. Eine Modifikation dieser Moleküle kann das Risiko einer Entartung erhöhen. Unter anhaltendem Umweltstress (u.a. Mobilfunkstrahlung, Anm. der Redaktion) werden ROS über einen langen Zeitraum generiert, sodass signifikante Schäden an Zellstruktur und -funktionen auftreten können. Tatsächlich wurde sowohl die Krebsinitiation als auch das Fortschreiten der Krankheit mit oxidativem Stress in Verbindung gebracht, indem DNA-Mutationen verstärkt oder DNA-Schädigungen, Genominstabilität und Zellteilung hervorgerufen wurden.

Um den Organismen vor diesen schädlichen Pro-Oxidantien zu schützen, existiert ein komplexes System von enzymatischen Antioxidantien (z.B. Superoxiddismutase (SOD), Glutathionperoxidase (GPx), Katalase, Glutathionreduktase) und nicht-enzymatischen Antioxidantien (z.B. Glutathion (GSH) Vitamin C und D). ROS sind an einem breiten Spektrum von Erkrankungen, einschließlich chronischer Entzündungen und einer Vielzahl verschiedener Krebsarten beteiligt. Chronische Entzündungen wiederum sind ebenfalls mit einem erhöhten Risiko verschiedener Krebsarten assoziiert. Der Zusammenhang zwischen Entzündungen und Krebs wurde durch epidemiologische und experimentelle Daten nahegelegt und durch entzündungshemmende Therapien (sowohl Krebsprävention als auch -behandlung) bestätigt. Der exakte Mechanismus, wie ein Wundheilungsprozess in Krebs verwandelt wird, ist Gegen-

stand intensiver Forschung. Mögliche Mechanismen wären z.B. das Auslösen genomischer Instabilität, Veränderungen epigenetischer Ereignisse, unangemessene Genexpression, verstärkte Teilung initiiertter Zellen und Resistenz gegen Apoptose. Der Fokus dieses Review liegt darauf, wie oxidativer Stress die verschiedenen Stadien der entzündungsvermittelten Krebsentwicklung beeinflusst.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Autoren dieses Reviews untersuchten wissenschaftliche Literatur zu dem Thema ROS, entzündliche Prozesse und Krebs.

### Ergebnisse:

Chronische Entzündungen wurden mit verschiedenen Schritten der Krebsentwicklung in Verbindung gebracht, darunter zelluläre Transformation (Entartung), Promotion, Überleben, Teilung, Invasion, Angiogenese und Metastasierung. Krebs ist ein mehrstufiger Prozess, der durch mindestens drei Stufen definiert ist: Initiation, Promotion und Progression. Oxidativer Stress beeinflusst alle drei Stadien dieses Prozesses. Während der Initiationsphase können ROS DNA-Schäden verursachen. In der Promotionsphase können ROS zu abnormaler Genexpression, Blockierung der Zell-Zell-Kommunikation und Änderung von Botenstoffen beitragen, was in einer Zunahme der Zellteilung oder Abnahme von Apoptose (programmierter Zelltod) in der entartenden Zellpopulation führen kann. Oxidativer Stress kann auch an der Tumorprogression beteiligt sein, indem er der entarteten Zellpopulation weitere DNA-Veränderungen hinzufügt. In den letzten Jahren haben zahlreiche Belege demonstriert, dass ROS an dem Zusammenhang zwischen chronischer Entzündung und Krebs beteiligt sind. Ein wichtiges Merkmal von Tumor promotoren ist es, entzündungsfördernde Zellen zu rekrutieren und sie zur Bildung von ROS anzuregen. Tatsächlich wurde in ersten Experimenten zur Rolle von ROS bei der Tumorentstehung angenommen, dass oxidativer Stress DNA-schädigend wird, so die Mutationsrate innerhalb der Zellen erhöht und damit die onkogene Transformation (Entartung) fördert. Neuere Studien konnten jedoch zeigen, dass ROS nicht nur genomische Instabilität verursachen, sondern auch zelluläre Signalwege aktivieren. Diese Signalwege regulieren beispielsweise Zellteilung, Wachstum von Blutgefäßen (Angiogenese) und Metastasierung und tragen so zur Krebsentwicklung bei. Eines der Hauptmerkmale von Tumorzellen ist deren erhöhte Überlebensfähigkeit im Vergleich zu normalen Zellen. Diese Überlebensfähigkeit wird durch veränderte zelluläre Signalwege vermittelt. Es ist beispielsweise bekannt, dass ROS in der Lage sind, das Signalprotein Aktin zu aktivieren. Aktives Aktin verhindert Apoptose und steigert den Sauerstoffstoffwechsel innerhalb der Zelle, was beides Zellüberleben fördert. Ein weiteres Merkmal von Tumoren ist deren unkontrollierte Zellteilung der Tumorzellen. Diese unkontrollierte Zellteilung benötigt wiederum die Hochregulierung verschie-

dener zellulärer Signalkaskaden. Tumorinvasion und Metastasierung, welche wichtige Merkmale von aggressiven Tumoren bzw. Krebsarten darstellt, kann ebenfalls durch Sauerstoffradikale verstärkt werden. Dies kann über Signalmoleküle und Matrix-Metalloproteasen geschehen. Matrix-Metalloproteasen sind in der Lage Komponenten der Basalmembran zu spalten. Dies wiederum führt dazu, dass die Tumorzellen den Kontakt zum Ursprungsort verlieren und so leichter Metastasierer bzw. in tiefere Gewebeschichten eindringen können. Auch die Angiogenese kann durch ROS beeinflusst werden. Angiogene Wachstumsfaktoren (z.B. VEGF, FGF und PDGF) werden von Tumorzellen oder entzündungsfördernden Zellen als Reaktion auf u.a. ROS in das Mikromilieu des Tumors freigesetzt. Die freigesetzten Wachstumsfaktoren aktivieren Endothelzellen, die neue Blutgefäße entstehen lassen.

### Schlussfolgerungen:

Laut den Autoren verdeutlicht diese Review die Rolle von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) in verschiedenen Phasen der Tumorentstehung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle verschiedenen Unterstadien der Tumorentwicklung durch ROS und Entzündungen beeinflusst werden. Frühe Stadien der Krebsentwicklung (z.B. zelluläre Transformation), bei denen DNA-Schädigungen eine wichtige Rolle spielen, seien jedoch am stärksten von ROS-bedingten Entzündungen betroffen. Die gezielte Steuerung redoxsensibler Signalwege und Transkriptionsfaktoren berge dementsprechend ein großes Potential bei der Krebsprävention und -therapie. (RH)



### Grundlagen der Navigation bei Tieren

## Mögliche Mechanismen der Orientierung am Magnetfeld

Barnes F, Greenebaum B (2020): Possible Mechanism for Synchronized Detection of Weak Magnetic Fields by Nerve Cells. *Bioelectromagnetics* 41 (3), 213-218

Es gibt zwei verschiedene Modelle, wie Tiere (Vögel, Fische u. a.) das Erdmagnetfeld zur Navigation oder zu vielen anderen Zwecken nutzen. Ein Ansatz ist, wie die Konzentration freier Radikale mit dem Magnetfeld zusammenwirkt. Bei der Navigation von Vögeln geht man davon aus, dass die Radikale von optischen Photonen in den Chromophoren der Augen erzeugt werden. Die Vorstellung ist, dass die Chromophoren von einem externen Magnetfeld durch den Mechanismus der Radikalpaarbildung beeinflusst werden. Der magnetische Teil von diesem Mechanismus ist empfänglich für magnetische Winkel (Deklination und Azimuth) zur Erdoberfläche, die aber nicht zwischen nördlicher oder südlicher Hemisphäre mit derselben Inklination

unterscheiden kann. Tiere nutzen zusätzlich eine Vielzahl von anderen Zeichen, die sie zur Navigation brauchen. Der andere Ansatz ist, dass die magnetischen Dipole von genügend großen Magnetit-Kristallen (oder Ketten von Magnetit-Kristallen,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) in den Zellen oder anderen stark magnetischen Stoffen mechanische Kräfte erzeugen, die von benachbarten Nerven empfunden werden. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass durch den Unterschied zwischen Dipolen, die in eine Richtung orientiert sind, die entgegen gesetzte Richtung wahrgenommen werden kann. Man weiß, dass Bakterien durch  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Partikel in Richtung Sediment auf dem Meeresboden unterhalb der sauerstoffreicheren Wasserschicht geleitet werden. Viele andere Ansätze wurden vorgeschlagen, hier wird ein alternativer Mechanismus vorgestellt, der für die anfängliche Wahrnehmung des Magnetfeldes für manche Fälle zutreffen kann.

### **Das Modell:**

Schwache Magnetfelder, die von einer feuernden Nervenzelle oder einer kleinen Gruppe von Nervenzellen erzeugt werden, beeinflussen wiederum benachbarte Nervenzellen. Dies kann einen Mechanismus darstellen, der die Stärke und Orientierung eines externen Magnetfeldes erkennt. Biologische Systeme könnten vielleicht statische oder extrem niederfrequente Magnetfelder dadurch erkennen, dass das feuern benachbarter Nervenzellen durch den Stromfluss verändert wird. Der Stromfluss erzeugt das Magnetfeld in der Nachbarzelle. Die Zeitverzögerung eines benachbarten Nervenzellpulses mit Bezug auf den anfänglichen Nervenzellpuls des Taktgebers kann das Signal sein, das Stärke und Richtung des entgegen gesetzten Stromflusses in den Zellen angibt. Bekannt ist, dass Änderungen des statischen Magnetfeldes die Konzentrationen von ROS, Calcium, pH, Wachstumsrate von Fibromzellen und Membranpotenziale ändern. Das ändert auch die Feuerungsrate der Schrittmacherzellen, die entweder hemmen oder beschleunigen. Dieser Mechanismus könnte von Tieren genutzt werden, die sich am Erdmagnetfeld zur Navigation orientieren oder andere Zwecke, möglicherweise in Verbindung mit anderen Mechanismen.

Während eines Aktionspotenzials in einer Nervenzelle gibt es komplexe Vorgänge im Stromfluss des Axons wegen der Na-, K-, Cl- und Ca-Ionen, die durch die Membran fließen quer zur Länge des Axons. Dadurch entsteht ein Stromfluss entlang des Axons, der ein Magnetfeld erzeugt. Da dieses Axon Kontakt zu Dendriten oder Axonen von Nachbarzellen hat, wird weiter angenommen, dass die Aktionspotentiale dieser Nachbar-Nerven zusammenarbeiten und zum Magnetfeld-Wahrnehmungssystem beitragen. Ein Nerv liefert einen Taktgeber-Puls, dessen zeitlicher Verlauf wichtige Informationen für das Magnetfeld-Wahrnehmungssystem gibt. Die Informationen könnten Richtung und Stärke des externen Feldes enthalten. Beim Übergang vom Aktionspotenzial in das Ruhepotenzial wird ein Magnetfeld in entgegen gesetzter Richtung erzeugt. Schwache Magnetfelder ändern Zellströme in wachsenden Zel-

len und ändern die Feuerungsrate in Schrittmacherzellen.

Das Nervensystem arbeitet allgemein über Abfolgen von Depolarisations-/Repolarisationspulsen zur Übertragung von Informationen. Wenn die Pulse in einer Nervenzelle wie ein Taktgeber fungiert, liefern die periodischen Pulse ein periodisches Signal, das es möglich macht, Signale vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden.

Außer schwachen Gleichfeldern können auch schwache Wechselfelder die Orientierung und andere Phänomene beeinflussen. Dieser Mechanismus könnte auch hier zutreffen. Magnetfelder können in die Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen eingreifen, die an der Umwandlung von Molekülen wie z. B. Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) in ein Sauerstoffradikal ( $\text{O}_2^-$ ) beteiligt sind, die dann andere Reaktionen beeinflussen, die nachfolgend im Stoffwechselablauf geschehen und das Membranpotential ändern. Dazu gehören Ausschüttung von Calcium-Ionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) und Stickstoffmonoxid (NO). Magnetfelder im Bereich 3–6  $\mu\text{T}$  beschleunigen die Oxidation von Cytochrom C bei 60 Hz. Cytochrom C bindet an die innere Membran von Mitochondrien, was wahrscheinlich ein Zeichen dafür ist, dass in Mitochondrien der Ort ist, wo Magnetfelder die Stoffwechselrate von wachsenden Zellen verändern. Mitochondrien sind die Organellen, die den Nervenzellen die meiste Energie bereitstellen und dabei Radikale wie  $\text{O}_2^-$ , oder NO und  $\text{H}_2\text{O}_2$  erzeugen. Diese Moleküle verändern die Leitfähigkeit der Membrankanäle für  $\text{Ca}^{2+}$  und das Membranpotenzial. Mitochondrien sind über die ganze Nervenzelle verteilt und kommunizieren wahrscheinlich miteinander. Sie fließen außerdem an den Mikrotubuli von Wirbeltieren hinunter und verteilen sich in den Axonen. Magnetfelder können die Konzentrationen von reaktiven Sauerstoffmolekülen (ROS) verändern, die von den Mitochondrien erzeugt werden. Das führt zur Ausschüttung von Calcium-Ionen in das Axon und ändert das Membranpotenzial. Änderungen im Membranpotenzial führen zu Änderungen im Intervall zwischen dem Feuern des Aktionspotenzials. Änderungen des statischen Magnetfeldes ändern die Konzentrationen von ROS, Calcium, pH, die Wachstumsraten in Fibromzellen und Membranpotenziale. Änderungen von Membranpotenzialen können die Feuerungsrate der Schrittmacher entweder hemmen oder beschleunigen.

### **Schlussfolgerungen:**

Das Modell ist, dass das von einer Schrittmacher-Nervenzelle erzeugte Magnetfeld genügend starke Magnetfelder erzeugt werden können, um eine Zeitverzögerung zwischen den Pulsen in benachbarten Nervenzellen hervorzurufen. Diese Zeitverzögerung könnte so verarbeitet werden, dass Stärke und Richtung eines externen Magnetfeldes wahrzunehmen ist, mit genügend großer Auflösung, um als Kompass für die Navigation der Tiere nutzbar zu sein. Denn die Zeitverzögerungen in zwei Nerven in Nachbarschaft zu einer Schrittmacherzelle könnten von unterschiedlicher Stärke sein. (IW)



## Elektrosensibilität

# Symptome und Mechanismen der Elektrosensibilität

Stein Y, Udassin IG (2020): Electromagnetic hypersensitivity (EHS, microwave syndrome) – Review of Mechanisms. Environmental Research, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109445>

Elektrosensibilität (Electromagnetic hypersensitivity, EHS), früher als Mikrowellensyndrom bezeichnet, geht klinisch mit einem breiten Spektrum von unspezifischen Symptomen in verschiedenen Organen einher, nachdem nieder- oder hochfrequente Felder eingewirkt haben. Zahlreiche Studien haben biologische Wirkungen auf Zellebene bei geringen Feldstärken von elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern gezeigt. Sowjetische Forscher hatten erstmals in den 1950er Jahren vom „neurotischen Syndrom“ berichtet. Ähnliche Symptome gibt es bei Multipler Chemikalien-Sensibilität (MCS), dabei ist das Zentralnervensystem als Folge von akuter oder chronischer Einwirkung von elektromagnetischen Feldern betroffen. Auswirkungen sind Kopfschmerzen, Müdigkeit, Stress, Schlafstörungen, Gedächtnisstörungen, Labilität und Ängstlichkeit. Andere Anzeichen sind Übelkeit, Atemnot, Muskelschmerzen, Appetitlosigkeit und Hautreaktionen. Die WHO nannte die klinischen Syndrome 2004 „Idiopathische Umweltintoleranz gegenüber elektromagnetischen Feldern“, in Schweden wird EHS offiziell als funktionelle Beeinträchtigung bezeichnet.

Die US-Regierung gab in den 1970er- und 1980er Jahren Berichte über berufliche Belastung mit elektromagnetischen Feldern heraus. Arbeiter mit erhöhter Expositionsdauer bekamen Kopfschmerzen, Schlafstörungen, Depressionen, Gedächtnisstörungen, vermehrtes Schwitzen u. a. 1980 gab es eine Arbeit mit einer Kohorte von 1300 Arbeitern. Arbeiter mit relativ geringen Feldern zeigten eine Verdoppelung von neuropsychiatrischen Symptomen. Arbeiter mit installierten Smartmetern außerhalb des Hauses berichten von Anstieg an Schlafstörungen, Tinnitus, Druck im Kopf und Konzentrationsstörungen, die mit steigenden Feldstärken stark anstiegen.

In einer Studie im Jahr 1997 wurden 3 Stufen der Entwicklung von EHS beschrieben. In der ersten Stufe erscheinen vorübergehend Symptome, die kommen und gehen, in der 2. Stu-

fe treten die Symptome mit steigender Dauer oder Intensität oder steigender Anzahl von Symptomen auf. Die 3. Stufe ist von neurologischen Symptomen begleitet, die die Betroffenen stark behindern, sogar nach Einwirkung geringer Feldstärken. Die Österreichische Ärztekammer erkennt 2012 Schlafprobleme, Muskel- und Gelenk- und Kopfschmerzen, Konzentrations- und Gedächtnisstörungen, Tinnitus und Druck in den Ohren als Symptome an. Eine Studie von 2010 fand Tinnitus ipsilateral (an der Seite, an der das Telefon gehalten wird) in einer Untergruppe von Handynutzern, die das Telefon seit 4 Jahren oder mehr genutzt hatten. Nach mehr als 60 Minuten Telefongespräch pro Tag über mindestens 4 Jahre entstehen subjektiv Symptome von Ohrerwärmung und Tinnitus, was man mit Ohrschädigung in Zusammenhang sieht. Die häufigsten Beschwerden von Leuten ist Kopfschmerz, was zwischen 2011 und 2016

in mehreren Studien erfasst wurde. Je länger pro Tag mobil telefoniert wurde, desto höher war der Anteil der Personen mit Beschwerden. Auch Ohrschmerzen treten vermehrt auf. Bei 9- bis 12-jährigen Kindern in China wurden nach Nutzung eines Handys für mehr als 1 Jahr eine Verdoppelung von Kopfschmerzen und Schlafstörungen festgestellt. Die Symptome sind meistens von den Betroffenen beschrieben; sie führen zu signifikanten Einschränkungen bis hin zu Behinderungen bei Erwachsenen und Kindern. Diese Übersichtsarbeit befasst sich mit den Quellen und Messungen der Feldbelastung, objektiven Messungen und klinischen Tests, die die Symptome und Gesundheitsbeeinträchtigungen bei den Patienten erklären können.

**Klar ist, dass viele Menschen empfindlich auf elektromagnetische Felder reagieren und deren Lebensqualität oft vermindert ist bis hin zu starker Behinderung. Weitere Forschung zu Gefahren durch das Mobiltelefon und des Internets ist nötig, besonders in Schulen, wo Kinder viele Stunden der Strahlung ausgesetzt sind.**

## Heutige Feldbelastungen

Die Feldbelastung wurde in 2008/2009 als 10- bis 15-mal höher als das natürliche Erdmagnetfeld angegeben. In 2010 wurde geschätzt, dass mehr als 2 Mrd. Menschen weltweit Mobiltelefone nutzen. Die elektromagnetischen Felder, denen Menschen potenziell ausgesetzt sind, gehen von einer Vielzahl von Geräten aus. Die Quellen für künstliche Hochfrequenz sind Basisstationen (2G-, 3G-, 4G-Technik), Antennen, Handys (GSM, UMTS, LTE) und spezielle Telekommunikationssysteme und Geräte (schnurlose Telefone, Laptops, Tablets, WLAN, LAN, Video, Radio, TV, Videospiele und z. B. Ablesegeräte für Wasser und Gas. Zukünftig wird 5G noch mehr Strahlung hinzufügen. Im Niederfrequenzbereich sind Hochspannungsleitungen, elektrische Installationen, Fluoreszenzlampen und Photoko-



pierer weitere Quellen.

### Physiologische Beweise für Gesundheitswirkungen

Mehrere Studien zitieren Abnormitäten in neuropsychiatrischen Tests bei Patienten, die solche Symptome angaben. Ein Forscher untersuchte 34 Angehörige der US-Air Force, die höheren Feldstärken ausgesetzt waren als die Grenzwerte erlauben. Die jungen Männer berichteten von akuten neurologischen Symptomen nach Bestrahlung und bei standardisierten neuropsychiatrischen Tests kam heraus, dass zwei Drittel der Personen übereinstimmende Ergebnisse zeigten mit antisozialer Persönlichkeit, leichten organischen Hirnsyndromen, Ängstlichkeit und Tendenz zu Somatisierung. Andere Studien zeigen Änderungen im zerebralen Blutfluss und Glucose-Stoffwechsel, was mit PET gezeigt werden kann. Ein Experiment mit gesunden Freiwilligen (50-Minuten-Gespräch mit dem Mobiltelefon) ergab einen Anstieg des Hirnstoffwechsels in Hirnschäden, die am nächsten an der Mobiltelefon-Antenne waren gegenüber der Kontrolle. Andere Studien fanden auch Änderungen im PET des Gehirns und Abnahme des Blutflusses im Gehirn. Belpomme fand 2015 bei 727 EHS- und MCS-Patienten normale Ergebnisse bei MRI und Carotis-Ultraschall, aber der Blutfluss in den Schläfenlappen beider Hemisphären war vermindert und im Vergleich zu normalen Patienten war bei EHS- und MCS-Patienten die zerebrale Pulsatilität verringert, in den Schläfenlappen fast verschwunden. Diese Messungen könnten unspezifisch sein, sie können aber potenzielle Änderungen in der Hirnfunktion bei diesen Patienten anzeigen.

### Mechanismen

Viele Mechanismen, die bei MCS auftreten, erscheinen ähnlich bei EHS. Wiederholte Einwirkung führt zu Empfindungen, durch gehäufte Einwirkung können die Symptome verstärkt werden. Viele hypersensitive ((überempfindliche)) Patienten scheinen unzureichende Entgiftungssysteme zu haben, die bei oxidativem Stress überfordert werden. Die Patienten können neurologische, neurohormonale und neuropsychiatrische Symptome haben, eine Folge der Nervenschädigung durch elektromagnetische Felder mit überempfindlichen Reaktionen der Nerven. Elektromagnetische Felder können Änderungen in der Calcium-Signalkaskade, signifikante Aktivierungsprozesse von Freien Radikalen und Überproduktion von Reaktiven Sauerstoffmolekülen (ROS) in lebenden Zellen bewirken, sie können Funktionen des Nervensystems, der Hirnleistung und der Blut-Hirn-Schranke beeinflussen. Durch Verbrennungsprozesse in der Umwelt befindliche Magnetit-Kristalle können aufgenommen werden und eine wichtige Rolle bei der Wirkung von elektromagnetischen Feldern auf das Gehirn spielen. Das autonome Nervensystem kann Symptome im Herz-Kreislauf-System hervorrufen. Andere Einflüsse betreffen die Haut, das Immun- und Blutbildungssystem. Die Mechanismen, die den EHS-Symptomen zugrunde liegen, sind biologisch plausibel.

### Schlussfolgerungen:

Man kann heute den elektromagnetischen Feldern nicht entkommen und es gibt viele Menschen, die Krankheitszeichen entwickeln. Diese Literaturarbeit enthält zahlreiche Berichte über neurologische und neuropsychische Krankheitszeichen, die einen zeitlichen Zusammenhang mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern haben wie Änderungen des Blutflusses im Gehirn, sichtbar im PET-Scan des Gehirns. Einige Forscher haben die Abnormalitäten im Temporallappen lokalisiert, was einleuchtet, weil das Mobiltelefon dort am nächsten ist.

Klar ist, dass viele Menschen empfindlich auf elektromagnetische Felder reagieren und deren Lebensqualität oft vermindert ist bis hin zu starker Behinderung. Weitere Forschung zu Gefahren durch das Mobiltelefon und des Internets ist nötig, besonders in Schulen, wo Kinder viele Stunden der Strahlung ausgesetzt sind. Es müssen mehr Diagnose-Tests für EHS entwickelt werden, die Grenzwerte sollten niedriger sein, die Strahlung vermindert werden, damit mehr Schutz vor biologischen Wirkungen möglich wird. Mehr Kabelverbindungen und weniger drahtlose Netzwerke sollten genutzt werden, um empfindliche Personen in der Gesellschaft zu schonen, und öffentliche Schutzräume sollten verfügbar sein. (IW)



### Magnetresonanz und Genschäden

## Forschung zu Genschäden durch MRI-Untersuchungen ist unzureichend

Wilen J, Olsrud J, Frankel J, Hansson Mild K (2020): Valid Exposure Protocols Needed in Magnetic Resonance Imaging Genotoxic Research. *Bioelectromagnetics* 41 (3), 247-257

Ein Magnetresonanzgerät verwendet 3 sehr unterschiedliche Magnetfelder zur Bilddarstellung: ein starkes statisches Feld, ein starkes niederfrequentes und ein hochfrequentes Feld. Die Feldstärken liegen an der Grenze dessen, was ein menschlicher Körper tolerieren kann, deshalb ist es sinnvoll zu untersuchen, ob es ein genschädigendes Potenzial gibt. Alle 3 Feldarten unterscheiden sich stark in deren biologischen und biophysikalischen Wirkungen, die in den Richtlinien von ICNIRP und CENELEC angegeben sind. Die IARC hat niederfrequente Magnetfelder und Hochfrequenz als möglicherweise Krebs erregend für den Menschen eingestuft. Grenzwerte für Dosis oder andere Parameter sind nicht definiert.

In den letzten Jahren haben mehrere In-vitro- und In-vivo-

Studien untersucht, ob Untersuchungen mit dem Magnetresonanztomographen (MRI) DNA-Schäden in menschlichen Blutzellen verursachen kann. Die Ergebnisse waren uneinheitlich. Die Gründe dafür können vielfältig sein. Hauptsächlich seien Feldbelastungen der Zellen im Scanner und das Studiendesign nicht ausreichend beschrieben worden. Deshalb sei eine Reproduzierbarkeit nicht gegeben und man könne die Studien nicht vergleichen. Die Frage ist, was „gute Praxis“ für eine Aussage zu den Feldbelastungen ist. In dieser Arbeit sollen Informationen zu den Feldbelastungen im MRI gegeben werden, was für Einflüsse es gibt und was nötig ist, um Experimente zur Genschädigung durch MRI durchzuführen. Hier soll ein näherer Blick auf die bisherigen Veröffentlichungen geworfen und Empfehlungen gegeben werden, wie „gute Praxis“ zur Feldbelastung bei Experimenten zu Genschäden erreicht werden kann.

Die ersten Studien können heute als Studien betrachtet werden, die zu Hypothesen führen. Für die Aufklärung, ob das MRI die DNA-Integrität (Unversehrtheit, Intaktheit) schädigen kann, sind die Expositionsbedingungen ausschlaggebend. Das Fehlen von ausreichenden Methodenbeschreibungen früherer Experimente macht es schwierig, wenn nicht unmöglich, sie zu wiederholen. Hier wird diskutiert, was in den früheren Studien fehlt und wie nach Auffassung der Autoren die nächste Generation von In-vitro- und In-vivo-Studien zu MRI und Genschädigung durchgeführt werden sollten.

### **Feldbelastung während einer MRI-Untersuchung**

Zur Feldbelastung während eines Scans werden hier nur die Magnetfelder betrachtet, die elektrischen Felder sind sehr gering außer in direkter Umgebung der Spulen. Idealerweise werden bei Nutzung von MRI-Scannern in Kliniken viele Daten im Protokoll des Experiments angegeben, damit das Experiment wiederholt werden kann, zu den Expositionsbedingungen und den platzierten Proben im Gerät. Dazu gehören SAR-Werte und induziertes elektrisches Feld in der Probe. Ohne genaue Angaben zur Position der Probe im Scanner sind die Werte nutzlos aufgrund der starken Gradienten entlang der 3 Achsen. Weitere genauere Angaben müssen vorhanden sein, z. B. zum SAR-Wert. Wenn keine SAR-Berechnungen oder Magnetfeldmessungen vorhanden sind, können ersatzweise Durchschnittswerte des Scanners für Ganzkörper-SAR-Werte über 6 Minuten gemittelt verwendet werden. Der genaue SAR-Wert muss errechnet werden. Um sagen zu können, ob MRI-Scans ein Risiko für Genschädigung darstellen, muss vor allem genau beschrieben werden, welchen Feldern die Zellkul-

turen ausgesetzt wurden. Man muss sich klarmachen, dass der angegebene SAR-Wert des Scanners nicht derselbe ist, der im Patienten oder der Blutprobe in Teströhrchen oder Petrischale ist. Man muss außerdem zwischen allen 3 Magnetfeldarten des MRI unterscheiden. Das einfachste ist das statische Feld, das hochfrequente Feld ist immer gepulst, die SAR-Werte können zwischen wenigen Hundertstel und über 1 W/kg variieren. Der schwierigste Teil ist die Dosimetrie des Gradientenfeldes. Ein Gradientenfeld wird von 3 verschiedenen Spulen in den 3 Achsen erzeugt. In der bestrahlten Probe kann es zu Unterschieden in den induzierten Strömen kommen, wenn das Material in einem Teströhrchen oder einer Petrischale enthalten ist. Die Stärke des Feldes hängt auch von dem Anteil der Flüssigkeit in jeder Probe ab. Hier sollte man das Experiment besser in einem Inkubator getrennt mit eindimensionalem Magnetfeld und kontrollierten Pulsen durchführen.

### **In-vitro-Studien:**

9 In-vitro-Studien zu DNA-Schädigung durch MRI haben stattgefunden mit menschlichen Blutproben und normalen MRI-Geräten in Kliniken. Nur in einer Studie wurden die Bestrahlungsbedingungen genau angegeben (HF- und Gradienten-Felder), das statische Feld wurde bei allen mit 1,5–7 T angegeben. Nur eine Studie hatte reproduzierbare Angaben gemacht. Angaben zur Platzierung der Proben im Scanner bedeuteten, dass die Gradienten zwischen 2 Proben bis 8,3 mT variierten. Manche Studien gaben SAR-Werte zur HF an. In Zukunft müssen gut konzipierte Studien mit genaueren Angaben zu Expositionsbedingungen und Dosimetrie sowie gut kontrollierte Bedingungen in den Zellkulturen während der Feldeinwirkung zur Verfügung stehen.

### **In-vivo-Studien:**

9 In-vivo-Studien mit Feldern zwischen 1 und 7 T (meistens werden 1,5-T-Geräte benutzt) wurden ausgewertet. Untersuchungsgegenstand waren gesunde Freiwillige (Alter zwischen 21–37 Jahre), Patienten (20–89 Jahre) oder beruflich exponierte Arbeiter. In den meisten Studien wurden Blutproben unmittelbar vor und nach dem MRI-Scan untersucht, einige bis 30 Minuten danach und 1 Studie ein Jahr danach. Der Standard war klinische Anwendung, in allen Studien fehlte es an der kompletten Dosimetrie. Die Unterschiede zwischen den In-vivo-Studien sind groß und deshalb ist es unmöglich, genschädigende Wirkung der MRI-Scans zu belegen. Die Stärke und Charakteristiken der einwirkenden Felder waren ebenfalls sehr unterschiedlich. Bei In-vivo-Experimenten ist wichtig, dass alle Teilnehmer dieselben Feldstärken erhalten, evtl. sollten die statischen und

**Da die Ergebnisse der bisherigen Studien nicht schlüssig sind, ob Genschäden auftreten können oder nicht, müssen in Zukunft alle Parameter genau beschrieben werden, damit andere Forscher an anderen Orten die Experimente wiederholen können.**

hochfrequenten Felder getrennt angewendet werden.

### Schlussfolgerungen:

Da die Ergebnisse der bisherigen Studien nicht schlüssig sind, ob Genschäden auftreten können oder nicht, müssen in Zukunft alle Parameter genau beschrieben werden, damit andere Forscher an anderen Orten die Experimente wiederholen können. Sonst wird man nicht herausfinden, ob es Genschädigungen gibt. Bisherige Studien haben verschiedene Feldbelastungen eingesetzt. Eine klare Hypothese ist nötig, dazu eine Stellungnahme darüber, ob irgendwelche genschädigenden Ergebnisse von akuten oder kumulativen Wirkungen herühren. Die gewählten Parameter der elektromagnetischen Felder müssen genaue Angaben zu Maximum-Werten und/oder gemittelten Werten über die Zeit enthalten. Es muss positive und negative Kontrollen, gut ausgearbeitete Versuchsdurchführungen mit strikter Standardisierung für in-vitro-Studien geben. Für In-vivo-Studien braucht man eine große Anzahl von Probanden, wobei die Auswahl „gesunde junge Männer“ ein Problem darstellt. (IW)



### Wirkung elektrischer Felder

## Niederfrequente elektrische Felder vermindern die Stressreaktionen bei Mäusen, sichtbar an Glucocorticoid-Konzentrationen im Blutplasma

Harakawa S, Hori T, Nedachi T, Suzuki H (2020): Gender and Age Differences in the Suppressive Effect of a 50 Hz Electric Field on the Immobilization-Induced Increase of Plasma Glucocorticoid in Mice. *Bioelectromagnetics* 41, 156-163

Die niederfrequenten elektrischen Felder (EF) von Hochspannungsleitungen (50 und 60 Hz) in häuslicher und industrieller Umgebung sind weit verbreitet, die biologischen Wirkungen zu verstehen ist daher von Bedeutung. Elektrische Felder wurden in Japan für mindestens 50 Jahre in Kliniken zur Behandlung und Erhaltung der Gesundheit angewendet, in medizinischen Einrichtungen und Haushalten, zur Behandlung von Knochenerkrankungen, Verbesserung der Knochenheilung oder Heilung von Wunden. Elektrische Felder können Hautschäden behandeln und Zell- und humorale Reaktionen auslösen. Die biologische Wirkung ist noch nicht gut verstanden. Elektrische Felder können leicht abgeschirmt werden, Magnetfelder nicht und sind deshalb wichtiger für den Menschen. Allerdings kann ein besseres Verständnis der biologischen Wirkung der elektrischen Felder beitragen, sie für Erhaltung und

Verbesserung der Gesundheit zu nutzen. Es gab bereits ein früheres Experiment zur Beurteilung der Wirksamkeit von 50-Hz-Feldern zur Reduktion der Stressreaktion bei immobilisierten Nagetieren. Die Wirkung auf Glucocorticoid-Gehalte (GC) im Plasma war verstärkt, wenn große Hautflächen betroffen waren, aber nicht bei kleinen Teilen der Hautoberflächen. Kürzlich wurde gezeigt, dass der Anstieg des GC-Gehaltes durch Fixierung der Mäuse reduziert war, wenn ein 50-Hz-Feld einwirkte. Die Wirkung war abhängig von Intensität (kV/m) und Dauer, besonders deutlich 20 Minuten nach Fixierung der Tiere. Die Forschergruppe entwickelte ein experimentelles System zur Charakterisierung der Wirkung von niederfrequenten elektrischen Feldern auf Stressreaktionen. Man wollte auch wissen, ob es Unterschiede bei Alterstufen und Geschlechtern gibt. Weil Stress eine wichtige Rolle beim Entwickeln von verschiedenen Erkrankungen spielt, könnten diese Ergebnisse zum Verständnis der Wirkungsweise von elektrischen Feldern beitragen.

### Studiendesign und Durchführung:

In allen Experimenten wurde Intensität von 10 kV bei 50 Hz eingesetzt, weil in früheren Experimenten herauskam, dass diese Intensität die höchste Anti-Stress-Wirkung hatte. Je 6 Tiere wurden in 4 Gruppen unterteilt: Scheinbestrahlte Kontrollen, männliche Mäuse (8, 13, 23, und 53 Wochen alt), intakte weibliche Mäuse sowie Mäuse, bei denen die Eierstöcke entfernt worden waren (8 Wochen alt). In den Gruppen Kontrolle, elektrische Felder allein, Immobilisierung allein und eine Gruppe fixiert und befeldet. Die Befeldung dauerte 60 Minuten. In einem zweiten Ansatz wurden Körpergewicht, GC-Gehalt, Zahl der weißen und roten Blutkörperchen sowie der Thrombozyten und Hämoglobin und Hämatokrit bestimmt.

### Ergebnisse:

Es gab keine Unterschiede in den Plasma-GC-Gehalten bei männlichen Tieren zwischen EF allein und den Kontrollgruppen, bei den fixierten Tieren jedoch waren die Gehalte signifikant höher, die durch Einwirkung der E-Felder signifikant vermindert wurden, aber höher lagen als bei den Kontrollen und EF allein. Ähnliche Trends gab es bei den weiblichen Tieren, aber generell hatten sie höhere Konzentrationen als die männlichen Tiere. Bei der Zahl der weißen Blutzellen gab es Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen, während die weiblichen Tiere höhere Werte bei roten Blutkörperchen, Hämoglobin und Hämatokrit hatten. Alle anderen Parameter zeigten Unterschiede, sowohl bei den Geschlechtern als auch bei den Altersgruppen, allerdings waren alle nicht-signifikant.

### Schlussfolgerungen:

Man konnte Unterschiede in den Reaktionen je nach Alter und Geschlecht feststellen, jedoch gab es nur beim Glucocorticoid-Gehalt signifikante Unterschiede. Die Tiere hatten unter

Stress durch Fixation signifikant höhere Werte, die durch die Feldbehandlung wiederum signifikant verringert wurden. Beide Werte lagen aber bei beiden Geschlechtern noch über den Kontroll- und EF-Werten. Zwischen intakten weiblichen Mäusen und denen ohne Eierstöcke gab es kaum Unterschiede. Die hier angewendeten elektrischen Felder hatten demnach eine supprimierende Wirkung auf den Glucocorticoid-Gehalt, d. h. sie haben eine Anti-Stress-Wirkung. Bei Geschlecht und Alter war der Plasma-GC-Gehalt bei den fixierten Mäusen dreimal höher als in der Kontrollgruppe, was wahrscheinlich auf den Einfluss der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse (HPA-Achse) des endokrinen Systems zurückzuführen ist.

Es wurde hier gezeigt, dass elektrische Felder den Anstieg von Stresshormonen unterdrücken, wenn die Mäuse fixiert sind. Durch die Fixierung allein steigen die Stresshormone signifikant an gegenüber den Kontrolltieren. Diese Reaktionen zeigten sich bei männlichen, intakten weiblichen und solchen Tieren, deren Eierstöcke entfernt worden waren. Weitere Studien mit mehrfacher und Langzeit-Befeldung sollten folgen, um die Wirkung der elektrischen Felder auf das endokrine System über Tage oder Wochen zu testen. Die jetzigen Ergebnisse beantworten fundamentale Fragen, wie elektrische Felder auf Geschlecht und Alter wirken, und bestätigen die Änderungen der Stressantwort durch die Felder trotz der Altersunterschiede. (IW)