

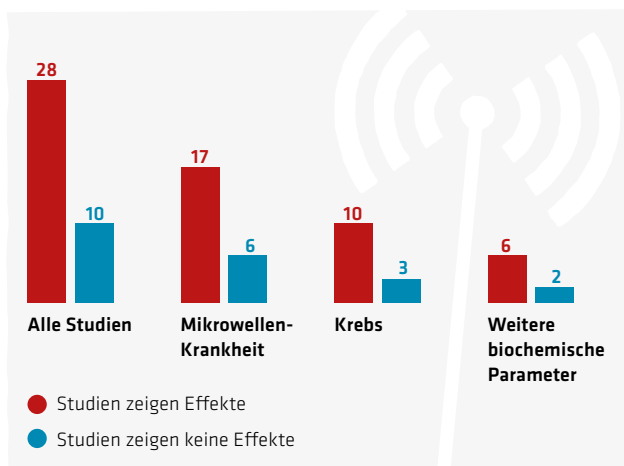
# ElektrosmogReport

Fachinformation zur Bedeutung elektromagnetischer Felder für Umwelt und Gesundheit

## Wirkung der Hochfrequenz von Sendeanlagen

### Belege für ein Gesundheitsrisiko durch Hochfrequenzstrahlung bei Menschen, die in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen leben: von der Mikrowellen-Krankheit zu Krebs

Balmori A (2022): Evidence for a health risk by RF on humans living around mobile phone base stations: From radiofrequency sickness to cancer. Environmental Research 214, 113851



Grafik: Anzahl der Studien zu Auswirkungen von Mobilfunk-Sendeanlagen, die Effekte zeigen (rot) oder keine Effekte zeigen (blau)

Diese Übersichtsarbeit gibt einen aktuellen vollständigen Überblick über die wissenschaftliche Literatur zur Wirkung von Mobilfunkantennen auf den Menschen. Vor 50 Jahren begannen Untersuchungen zu Auswirkungen von Radio-, Fernseh- und Radarantennen. In den letzten Jahren wurden weltweit hunderttausende Basisstationen aufgestellt, die auf die Bevölke-

#### Impressum

ElektrosmogReport Ausgabe 03/2022, 28. 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. 52203

#### Redaktion ElektrosmogReport

Dipl.-Biol. Isabel Wilke (IW), Roman Heeren (RH), M.Sc., Alain Thill (AT), M.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

### SEITE

01 > Wirkung der Hochfrequenz von Sendeanlagen

03 > Review zur Spermienqualität

04 > HF-Wirkung auf spermienbildende Zellen

05 > Mobilfunkwirkung auf gesunde Spermien *in vitro*

06 > 5G-Wirkung auf Vertebraten

07 > Oxidative Wirkung von Hochfrequenz

08 > Wirkung von 3,0 GHz auf Nervenzellen

09 > DNA-Schäden: Mobilfunk im Vergleich zu Niederfrequenz

10 > THz-Strahlung und Calciumkanäle

11 > Magnetsinn des Menschen

12 > Natürlicher Elektromagnetismus und Biorhythmen

13 > Mechanismen des Magnetsinns

15 > Nachruf auf Professor Dr. Franz Adlkofer

16 > Weitere Adressen

zung und die Natur – auch Naturschutzgebiete – einwirken, in den Städten mehr als auf dem Land. Biologische und gesundheitliche Umweltauswirkungen der elektromagnetischen Strahlung wurden kaum beachtet. In Indien beispielsweise sind etwa 15 % der Bevölkerung mehr als 12 V/m ausgesetzt, in Schweden wurden 2018 auf dem Land bei Frequenzen zwischen 3 und 30 MHz mittlere Leistungsflussdichten von  $16 \mu\text{W}/\text{m}^2$  und in Städten  $2400 \mu\text{W}/\text{m}^2$  gemessen. Die Feldstärken variieren stark, je nach Abstand zur Antenne, auch innerhalb von Gebäuden. Es gibt gegensätzliche Aussagen dazu, ob Basisstationen Gesundheitsrisiken darstellen: Einige sagen, es gibt keine, andere Wissenschaftler fanden erhöhte Krebsraten oder andere Gesundheitsprobleme.

### Studiendesign und Durchführung:

Ausgewählt wurden ausschließlich Arbeiten, die unter realen Bedingungen Mobilfunk-Basisstationen nahe an Wohnungen in Städten, oder größere Gebiete mit vielen Antennen aufgrund von Berechnungen und geografischen Daten untersucht hatten. Gesucht wurde in EMF-Portal, Google Scholar und PubMed nach „mobile base station and health“ und „cell tower and health“. Studien mit weiteren Strahlungsquellen (WLAN, Radio, TV, Radar, Smartmeter usw.) wurden für die Ergebnisse ausgeschlossen (85 Stück), aber in den Schlussfolgerungen berücksichtigt, da sie wichtige Aspekte enthalten.

### Ergebnisse:

Insgesamt ergab die Untersuchung 3 Typen von gesundheitlichen Auswirkungen: 1. Mikrowellen-Krankheit (z. B. Kopfschmerzen, Schlafstörungen u. v. a.), 2. Krebs und 3. Veränderungen der biochemischen Parameter. Von den 38 Arbeiten – die meisten hatten 900 und 1800 MHz untersucht – fanden 28 (73,6 %) Wirkungen: Mikrowellen-Krankheit 73,9 % (17 von 23), Krebs 76,9 % (10 von 13) und Veränderungen der biochemischen Parameter 75,0 % (6 von 8). Aufgeschlüsselt nach Studienart zeigt sich bei der Mikrowellen-Krankheit „Wirkung nein“ zu „Wirkung ja“: 6/17, bei Krebs 3/10 und bei biochemischen Parametern 2/6. Das heißt, die meisten Forschergruppen aus 20 verschiedenen Ländern ziehen dieselben Schlussfolgerungen.

Die Studien der 3 Kategorien zeigen trotz einiger Einschränkungen und Unterschiede zusammen ein stimmiges Bild bezüglich der gesundheitlichen Wirkungen auf Menschen, die in der Nähe von Basisstationen leben. Die zusätzlichen wichtigen Ergebnisse der oben erwähnten 85 Studien lieferten ähnliche Wirkungen von verschiedenen Strahlungsquellen wie Radar,

Radio, TV, Schnurlostelefonen, Smartmetern und Hochspannungsleitungen, oder es waren theoretische Abhandlungen, Simulationen und Laborstudien, die die Schlussfolgerungen dieser Übersicht untermauern. Von besonderer Bedeutung sind die Studien mit Tieren oder Bäumen in der Nähe von Basisstationen, da psychosomatische Wirkungen ausgeschlossen werden können. Wichtige Laborstudien wie die NTP- und Ramazzinistudie haben die Krebs erregenden Wirkungen von Mobilfunkstrahlung klar belegt, die NTP-Studie auch DNA-Schädigung. Ebenso ergänzen Studien aus dem letzten Jahrhundert die Ergebnisse, die bei beruflicher Nutzung von Radar-, TV- und Radiofrequenzen gefunden wurden: Anstieg von Fehlgeburten, veränderte Anzahlen von roten und weißen Blutzellen, Anstieg von Kinder-, Hoden- und anderen Krebsarten. Bei kanadischen und US-Amerikanischen Diplomaten trat 2016–2017 das so genannte Havanna-Syndrom auf, das mit Schlaf- und Hörstörungen, Kopfschmerzen, neurologischen Störungen, Übelkeit u. a. einherging; ähnliche Symptome wurden früher von der Moskauer Botschaft berichtet. Smartmeter können ähnliche Symptome hervorrufen.

Bei einigen Studien, die keine Wirkungen finden, ist von Wahrnehmungsstörungen und Nocebo-Effekt die Rede. Das kann aber nicht bei Krebs oder Unfruchtbarkeit sowie bei Tieren und Pflanzen auftreten. Die vielfach nachgewiesenen plausiblen Mechanismen wie Änderungen der Ionenkanäle, der Bildung von freien Radikalen und Eingriffe in Stoffwechselwege können die schädlichen Wirkungen erklären. Einige Studien belegen, dass die Forschungsergebnisse davon abhängen, wer die Studien bezahlt hat.

Bei einigen Studien, die keine Wirkungen finden, ist von Wahrnehmungsstörungen und Nocebo-Effekt die Rede. Das kann aber nicht bei Krebs oder Unfruchtbarkeit sowie bei Tieren und Pflanzen auftreten. Die vielfach nachgewiesenen plausiblen Mechanismen wie Änderungen der Ionenkanäle, der Bildung von freien Radikalen und Eingriffe in Stoffwechselwege können die schädlichen Wirkungen erklären. Einige Studien belegen, dass die Forschungsergebnisse davon abhängen, wer die Studien bezahlt hat.

### Schlussfolgerungen:

Das Ergebnis dieser Übersicht zeigt 3 Typen von Wirkungen durch die Strahlung von Basisstationen auf die menschliche Gesundheit: Mikrowellenkrankheit (nein 6, ja 17), Krebs (nein 3, ja 10) und Änderungen der biochemischen Parameter (nein 2, ja 6). Demzufolge scheinen sich Wissenschaftler einig zu sein, dass es schwerwiegende Probleme gibt, die von Experten durch wichtige Appelle ausgedrückt wurden (Blank et al. 2015, Hardell und Nyberg 2020). Allerdings haben weder die Medien noch verantwortliche Organisationen diese wichtigen Informationen in die Bevölkerung getragen, so dass die Menschen uninformiert bleiben. Deshalb wird die heutige Situation wahrscheinlich in einer Krise enden, nicht nur gesundheitlich, sondern auch für diese Technologie, weil sie nicht nachhaltig und schädlich für Mensch und Umwelt ist. (IW)

**Wissenschaftler scheinen sich einig zu sein, dass es schwerwiegende Probleme gibt, die von Experten durch wichtige Appelle ausgedrückt wurden. Trotzdem bleibt die Bevölkerung uninformiert.**



### Review zur Spermienqualität

## Auswirkungen der Nutzung von Mobiltelefonen auf die Spermienqualität – keine zeitabhängige Beziehung zur Nutzung: Eine systematische Übersichtsarbeit und aktualisierte Meta-Analyse

Kim, S., Han, D., Ryu, J., Kim, K., & Kim, Y. H. (2021): Effects of mobile phone usage on sperm quality – No time-dependent relationship on usage: A systematic review and updated meta-analysis. In *Environmental Research* (Vol. 202). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111784>

Globalisierung und Modernisierung haben die Menschheit in hohem Maße abhängig von elektronischen Geräten gemacht. In den meisten Industrieländern liegt die Verbreitung von Smartphones bei über 80 %. Die von Smartphones ausgesendete hochfrequente Strahlung steht im Verdacht, negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu haben. Eine Vielzahl von Studien beschreibt, dass Vitalität, Beweglichkeit sowie Anzahl von Spermien nach Einwirkung von Mobilfunkstrahlung deutlich abnehmen. Andere negative Wirkungen von Hochfrequenz auf die männliche Fruchtbarkeit beinhalten Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies, DNA-Fragmentierung, mitochondriale Apoptose sowie Veränderungen von Hormonspiegeln. Trotz dieser negativen Folgen der Hochfrequenz sind die Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung auf den Körper weiterhin umstritten. Eine frühere Meta-Analyse der Autoren aus dem Jahr 2014 bewertete die Verringerung der Beweglichkeit, Lebensfähigkeit und Konzentration von Spermien. Allerdings wurden diese Auswirkungen auf Grundlage von Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein einer Hochfrequenzbelastung untersucht. Auf Grund der hohen Verbreitungsrate von Mobiltelefonen re-evaluieren die Autoren die Auswirkungen auf die Spermienqualität in Abhängigkeit der Dauer der Nutzung, um die aktuelle Situation genauer zu erfassen. Außerdem wurden aktuelle Studien sowie neue Subgruppenanalysen durchgeführt, um präzisere Ergebnisse präsentieren zu können.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Wissenschaftler identifizierten insgesamt 119 wissenschaftliche Publikationen, welche zwischen 2012 und 2021 veröffentlicht wurden, wovon 18 alle Qualitätskriterien erfüllten und in diese Meta-Analyse einbezogen wurden. Diese 18 Studien beinhalteten 4280 Proben. 16 Publikationen lieferten Daten zur Beweglichkeit, 6 zur Lebensfähigkeit und 12 zur Konzentration der Spermien. Alle *in vitro* Studien waren experimentell, während alle *in vivo* Studien auf Beobachtungen beruhten. Bei der Subgruppenanalyse wurde nach vier Kriterien klassifiziert: Art der Kontrollgruppe (nicht bestrahlt vs. weniger bestrahlt), Studiendesign (*in vitro* und *in vivo*), Teilnehmergruppe (Fertilitätsklinik oder all-

gemeine Bevölkerung) und Aufbewahrungsort des Mobiltelefons (Hosentasche oder nicht).

### Ergebnisse:

Übereinstimmend mit der vorangegangenen Meta-Analyse von 2014 stuften die Autoren die Wirkung der Mobilfunknutzung auf die Spermienqualität als schädlich ein. Bei der Beweglichkeitsanalyse wurden 16 Studien mit 3446 Proben untersucht. 12 Studien beschrieben eine signifikant negative Auswirkung der Hochfrequenz auf die Beweglichkeit menschlicher Spermien (11,47 % – 86,8 % durchschnittliche Gesamtbeweglichkeit). Entsprechend wurden 6 Studien mit 783 Proben für die Beurteilung der Lebensfähigkeit analysiert. Alle 6 Publikationen zeigten einen negativen Zusammenhang zwischen Handynutzung und der Lebensfähigkeit der Spermien auf. Die Spanne der mittleren Lebensfähigkeit lag in allen Studien zwischen 51,3 % und 89 %. In Bezug auf die Spermienkonzentration wurden 12 Studien mit 3796 Proben bewertet. Wieder wurde eine nachteilige Wirkung des Mobilfunks bestätigt. Die Spanne der durchschnittlichen Spermienkonzentration betrug 12,84 % – 85,89 %. Die Subgruppenanalyse des Aufbewahrungsorts zeigte keine signifikanten Unterschiede. Laut den Autoren ist dies ein Beleg dafür, dass die Mobilfunkwirkung auf nicht-thermischen Effekten beruht. Wäre die thermische Wirkung größer als die nicht-thermische, würden Personen, die ihre Mobiltelefone in der Hosentasche aufbewahren, eine signifikante Abnahme der Spermienparameter aufweisen, da für eine thermische Wirkung ein unmittelbarer Kontakt zur Erwärmung des Gewebes notwendig ist. Weitere wichtige Ergebnisse der Subgruppenanalyse demonstrieren eine Dosis-Wirkung-Beziehung (Gruppe mit starker Mobilfunknutzung zeigt stärkere Abnahme der Spermienqualität) sowie eine größere Verminderung der Qualitätsparameter bei den *in vivo* Studien. Die Meta-Analyse besitzt jedoch auch Limitationen. So besitzt beispielsweise jede einzelne Studie ihr eigenes Studiendesign (Einheiten, Dosimetrie, Befeldungsdauer etc.). Außerdem ist nicht auszuschließen, dass gewisse Störvariablen (z.B. Lebensweise, andere Bestrahlungsquellen wie WLAN) ebenfalls Einfluss auf die beobachteten Auswirkungen haben. Die Wichtungsanalyse zeigte jedoch keinen signifikanten Extremwert, was darauf hinweist, dass die gezogenen Schlüsse richtig sind.

### Schlussfolgerungen:

Die Nutzung von Mobiltelefonen verringerte die Spermienqualität, indem sie Beweglichkeit, Lebensfähigkeit und Konzentration beeinträchtigte. Die Subgruppenanalyse lässt auf eine nicht-thermische Wirkung mit Dosis-Wirkung-Beziehung schließen, welche auf Grund der ausgeprägten Qualitätsverluste bei der *in vivo*-Subgruppe klinische Bedeutung aufweist. Aus diesem Grund sei laut den Autoren die langfristige Mobilfunknutzung ein Faktor, welche als Ursache für die Verminderung der Spermienqualität in Betracht gezogen werden müsse. Es seien jedoch weitere Studien erforderlich, insbesondere um die Auswirkungen moderner Mobiltelefonmodelle ermitteln zu können. (RH)



### HF-Wirkung auf spermienbildende Zellen

## Wirkung langfristiger WLAN-Exposition von der Vorpubertät bis zum Erwachsenenalter auf die Spermatoгонien-Zellteilung und schützende Wirkung einer Nahrungsergänzung mit essbarem Vogelneest

Jaffar, F. H. F., Osman, K., Hui, C. K., Zulkefli, A. F., & Ibrahim, S. F. (2022). Long-Term Wi-Fi Exposure From Pre-Pubertal to Adult Age on the Spermatogonia Proliferation and Protective Effects of Edible Bird's Nest Supplementation. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.828578>

Kinder nutzen heutzutage bereits vor Beginn der Pubertät WLAN und werden dies möglicherweise bis ins Erwachsenenalter hin tun. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass Kinder länger der WLAN-Strahlung ausgesetzt sein werden als Menschen, welche zum jetzigen Zeitpunkt bereits erwachsen sind. In Anbetracht der Tatsache, dass die Hoden empfindlich gegenüber von WLAN ausgesendeter Hochfrequenz sind, liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf der Bewertung der WLAN-Wirkung auf den Hoden, wenn dieser bereits seit der Kindheit der Strahlung ausgesetzt ist. Der Hoden ist das wesentliche Organ für die männliche Gametenproduktion durch die Spermatogenese. Vor dem Beginn der ersten Meiose (Keimzellteilung), müssen die spermienbildenden Stammzellen (Spermatogonien) zwei Prozesse durchlaufen. Der erste ist die Mitose zur Aufrechterhaltung des Stammzellenbestands, der zweite eine Differenzierung zur Bildung von Spermatogonien-Vorläuferzellen. Diese differenzierten Spermatogonien sind durch das Protein c-Kit gekennzeichnet, welches mit dem Protein SCF (stem cell factor) interagiert. Diese Interaktion ist entscheidend für Überleben und Teilung der differenzierten Spermatogonien und den Beginn der Spermatogenese. Neben der c-Kit-SCF-Interaktion wird die Teilung der Spermatogonien auch durch Fortpflanzungshormone, wie Testosteron, dem follikel-stimulierenden Hormon (FSH) und dem luteinisierenden Hormon (LH), beeinflusst. Neben der Bewertung der Auswirkung von vorpubertärer WLAN-Strahlung auf den Hoden, wurde in dieser Studie auch eine Nahrungsergänzung mit essbarem Vogelneest (EBN) durchgeführt, um möglicherweise negative Auswirkungen zu kompensieren. EBN werden von Mauerseglern unter Verwendung von verfestigtem Speichel hergestellt und gelten in der chinesischen Küche als Delikatesse. In einer *in vitro* Studie wurde demonstriert, dass EBN positive Auswirkungen auf die Zellteilung besitzt. Außerdem wurde beschrieben, dass EBN männliche Fortpflanzungshormone enthält und Potenzial als alternative Behandlung für erektile Dysfunktion zeigt.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Wissenschaftler teilten 30 männliche Spague-Dawley Rat-

ten zufällig in 5 Gruppen ein (n = 6): Kontrollgruppe, Kontrollgruppe + EBN, WLAN-Gruppe, WLAN-Gruppe + EBN, „Idle“ WLAN-Gruppe. Diese drei Wochen alten Tiere, welche in ihrer Entwicklung siebenjährige Kinder repräsentieren, wurden 14 Wochen lang befledet, bis zum Alter von 17 Wochen. Im Alter von 17 Wochen repräsentieren die Tiere 33 Jahre alte Menschen. Als Strahlungsquelle wurde ein WLAN-Router (2,45 GHz, TP-Link AC750 wireless Dual Band Wi-Fi Router Archer C20) verwendet, welcher in 20 cm Abstand zu den Käfigen der Tiere aufgestellt wurde. Bei den WLAN-Gruppen wurde der Router durch ständige Kommunikation (Ping-Protokoll über Bitvise SSH-Client-Software) mit einem Raspberry Pi in einem aktiven Zustand gehalten. Es wurden 10 Pings pro Minute gesendet. Bei der „Idle“ Gruppe wurde der Router eingeschaltet gelassen, allerdings wurde er nicht durch das Ping-Protokoll im aktiven Zustand gehalten und daher von den Autoren als inaktiv betrachtet. Basierend auf dem Bericht über die maximal zulässige Strahlung des Routers beträgt die spezifische Absorptionsrate (SAR-Wert) ca. 0,41 W/kg. Die EBN-Nahrungsergänzung erfolgte mit 250 mg/kg. Nach Ende der 14-wöchigen Befledung wurde der Organkoeffizient (Gewicht des Organs/Körpergewicht x 100) von Hoden, Nebenhoden und Hodenkanälchen, die Mitose der Spermatogonien, die Proteine c-Kit und SCF sowie die Fortpflanzungshormone Testosteron, FSH und LH bewertet.

### Ergebnisse:

Die WLAN-Hochfrequenz besaß keine Auswirkungen auf die Organkoeffizienten. Bemerkenswerter Weise verminderte EBN jedoch die Organkoeffizienten der Hoden sowie Nebenhoden. Sowohl die WLAN-Gruppe als auch die „Idle“ WLAN-Gruppe (Router eingeschaltet aber inaktiv, siehe Studiendesign und Durchführung) wiesen signifikant verminderte Mitose der Spermatogonien im Vergleich zur Kontrollgruppe auf. Die EBN-Supplementierung konnte die Zellteilung wieder auf ein normales Niveau anheben. Die Proteinbildung von c-Kit und SCF wurde nicht durch die Hochfrequenz beeinflusst. Das Serum-Testosteron-Level wurde ebenfalls nicht durch WLAN verändert. Bei FSH war ein graduell abnehmender Trend des Spiegels zu beobachten, dieser war jedoch nicht statistisch signifikant. Der Serum-LH-Spiegel war nach Befledung sowohl in der WLAN als auch der „Idle“ Gruppe statistisch signifikant vermindert. Auch die EBN-Nahrungsergänzung führte zu einem verminderten LH-Serumspiegel.

### Schlussfolgerungen:

Die langfristige WLAN-Befledung von sich entwickelnden Ratten besitzt negative Auswirkungen auf ihr Fortpflanzungssystem. Die Zellteilung der Spermatogonien wurde signifikant vermindert. Die Autoren sehen dafür zwei mögliche Erklärungen, welche sich nicht gegenseitig ausschließen müssen. 1) Obwohl die Proteinlevel von c-Kit und SCF nicht verändert waren, wäre eine modifizierte Interaktion zwischen den beiden Proteinen denkbar, welche wiederum zu einer verminderten Mitose führt. 2) Der verringerte LH-Serumspiegel weist auf eine WLAN-Wirkung auf die Hypoth-

lamus-Hypophysen-Gonaden-Achse (HPG) hin, welche sich negativ auf die Spermatogonien-Mitose auswirken könnte. Die Hochfrequenzwirkung wurde durch die Verwendung eines Ping-Signals von 64 bps erzielt, was um ein Vielfaches unter dem Datenverkehr liegt, dem wir im Alltag begegnen. Die Autoren hypothesieren, dass aufgrund der höheren Übertragungsrate im alltäglichen Leben stärkere Auswirkungen erwartet werden könnten. Laut den Wissenschaftlern könnten die Ergebnisse möglicherweise das Fortschreiten der Unfruchtbarkeit von Kindern, welche das fortpflanzungsfähige Alter erreichen, erklären. Sie fordern eine Minimierung der WLAN-Nutzung von Kindern, aufgrund des Risikos, welches mit WLAN einhergeht. In der Nahrungsergänzung mit EBN zur Abschwächung der schädigenden WLAN-Wirkung sehen die Autoren Potenzial. Trotz der Nebenwirkungen, welche einen verminderten Organkoeffizienten von Hoden und Nebenhoden sowie verminderte Gonadotropine beinhalten, wurde die Spermatogonienteilung nach Hochfrequenzbelastung erhöht. Sie vermuten, dass die Nebenwirkungen durch das Hormon Estradiol hervorgerufen werden, welches ebenfalls in EBN vorhanden ist. (RH)



## Mobilfunkwirkung auf gesunde Spermien *in vitro* Die schädliche Wirkung von Handystrahlung auf die biologischen Eigenschaften von Spermien gesunder Männer

Hassanzadeh-Taheri, M., Khalili, M. A., Hosseini Mohebati, A., Zardast, M., Hosseini, M., Palmerini, M. G., & Doostabadi, M. R. (2022): The detrimental effect of cell phone radiation on sperm biological characteristics in normozoospermic. *Andrologia*, 54(1), e14257. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/and.14257>

Die Unfruchtbarkeit des Menschen nimmt in der modernen Gesellschaft zu. Diese Zunahme steht im Zusammenhang mit verschiedenen Faktoren, wie z.B. Lebensweise, Ernährung, aber auch Nutzen von elektronischen Geräten und der damit verbundenen Strahlung. In diesem Kontext ist der regelmäßige und längerfristige Kontakt zu Geräten, welche hochfrequente elektromagnetische Wellen aussenden, problematisch. Die Angewohnheit, Mobiltelefone in der vorderen Hosentasche zu tragen, führt dazu, dass die hochfrequente Strahlung in unmittelbarer Nähe des männlichen Fortpflanzungssystems ausgesendet wird. Eine längerfristige Belastung mit Hochfrequenz kann die Spermienproduktion, -beweglichkeit und -morphologie beeinträchtigen sowie zu oxidativem Stress in den Hoden führen. Eine übermäßige Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) kann ein hormonelles Ungleichgewicht, Funktionsstörungen der Hoden sowie Gewebe- und Zellschädigungen hervorrufen. Allerdings

ist die Studienlage zu der Wirkung von Hochfrequenz auf männliche Fruchtbarkeitsparameter kontrovers. Die hier vorgestellte Studie beschäftigt sich mit der Auswirkung von Mobilfunkstrahlung auf die biologischen Eigenschaften menschlicher Spermien *in vitro* unter Verwendung verschiedener zytologischer Tests.

### Studiendesign und Durchführung:

Bei dieser *in vitro* Studie wurden 60 Spermienproben gesunder Männer nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Krankheiten wie Orchitis, Varikozele, Hydrozele, Diabetes mellitus, Bluthochdruck sowie Herz-, Nerven- und Nierenkrankheiten wurden ausgeschlossen. Nach der Bewertung der Spermien durch einen automatischen Spermienanalysator wurde jede Probe gleichmäßig aufgeteilt für Befeldung bzw. Schein-Befeldung. Als Strahlungsquelle diente ein Mobiltelefon (Sony Ericsson W300i, SAR-Wert = 1,2 W/kg), welches 2,5 cm entfernt von den Proben platziert wurde. Bei den befeldeten Proben war die Antenne des Mobiltelefons aktiv, bei den scheinbestrahlten deaktiviert. Die Hochfrequenzbelastung erfolgte über 1 h in einem Inkubator. Folgende Spermienparameter wurden analysiert: Morphologie, Beweglichkeit, Überlebensfähigkeit, Chromatinreifung, Chromatinabnormalität, Apoptose und DNA-Fragmentierung. Die Spermienmorphologie wurde mittels Diff-Quick-Färbung überprüft. Die Beweglichkeit wurde als Prozentsatz progressiver Spermien bzw. nicht-progressiver Spermien ausgedrückt. Als Kriterium für die Überlebensfähigkeit wurde die Membranintegrität gewählt, welche mittels Eosin-Nigrosin-Färbung analysiert wurde. Chromatinreifung bzw. -abnormalität wurden respektive durch Anilin-Blau- und Toluidin-Blau-Färbung untersucht. Um apoptotische Spermien zu detektieren, wurde der TUNEL-Assay verwendet. Die DNA-Fragmentierungsanalyse erfolgte mittels Chromatindispersionstest.

### Ergebnisse:

Die zytologischen Tests zeigten, dass die Spermienbeweglichkeit und -überlebensfähigkeit nach der Befeldung statistisch signifikant vermindert waren. Gleichzeitig war die Anzahl apoptotischer Spermien sowie die DNA-Fragmentierung signifikant gesteigert. Bei den anderen untersuchten Parametern (Morphologie, Chromatinreifung und Chromatinabnormalität) wurden keine statistisch signifikanten Auswirkungen der Hochfrequenz beobachtet.

### Schlussfolgerungen:

Die Autoren schlussfolgern aus diesen Daten, dass Mobilfunkstrahlung biologische Eigenschaften von Spermien wie Beweglichkeit, Überlebensfähigkeit und DNA-Integrität bei gesunden Männern beeinträchtigen können. Daher empfehlen sie Männern, ihre Mobiltelefone von ihrem Becken fernzuhalten. (Anmerkung der Redaktion: Um eine Bewertung des Befeldungsvorgangs besser vornehmen zu können, wäre es wünschenswert gewesen, diesen besser zu charakterisieren. Weder wurde das GSM-Band (Frequenz) angegeben, noch wie genau der aktive Antennenmodus erzeugt wurde.) (RH)



### 5G-Wirkung auf Vertebraten

## Transkriptomische Veränderungen und langfristige Verhaltensdefizite assoziiert mit 3,5-GHz-Hochfrequenzbestrahlung während der Entwicklung von Zebrafärblingen

Dasgupta, S., Leong, C., Simonich, M. T., Truong, L., Liu, H., & Tanguay, R. L. (2022): Transcriptomic and Long-Term Behavioral Deficits Associated with Developmental 3.5 GHz Radiofrequency Radiation Exposures in Zebrafish. *Environmental Science and Technology Letters*, 9(4), 327–332. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00037>

Die schrittweise Einführung von 5G hat in den letzten Jahren zu einer verstärkten Erforschung ihrer möglichen gesundheitlichen Auswirkungen geführt. Da ein Mangel an robusten, wissenschaftlichen Daten besteht, herrscht eine Skepsis gegenüber der Sicherheit dieser nicht-ionisierenden Strahlung. Diese berechtigten Bedenken wurden allerdings auch missbraucht, um unbegründete Verschwörungstheorien, wie z.B. einen Zusammenhang zwischen 5G und COVID-19, zu schüren. Dementsprechend ist es von großer Bedeutung, die nicht-thermischen, biologischen Auswirkungen von 5G zu untersuchen, um belastbare wissenschaftliche Daten zu generieren.

Der Zebrafärbling ist ein relevantes Modell für die menschliche Gesundheitsforschung. Die Entwicklungsstadien des Zebrafärblings reagieren empfindlich auf Umweltstress. Außerdem können Zielmoleküle einfach aus Ganztierproben ermittelt werden. Damit hat der Zebrafärbling einige Vorteile gegenüber z.B. Nagetieren als Modellorganismus, z.B. was physische Größe, Generationszeit, interne Entwicklung, hohe Kosten und auch Probenaufarbeitung anbelangt. Die Autoren der hier vorgestellten Studie nutzen dieses Modell, um die Auswirkungen von Hochfrequenz auf biologische Prozesse, genauer gesagt sensomotorische Verhaltensänderungen und deren transkriptomische Grundlage zu untersuchen. (Als Transkriptom bezeichnet man die Gesamtheit der zu einem definierten Zeitpunkt abgelesenen Gene. Diese abgelesenen Gene (DNA) werden in mRNA überschrieben. Die mRNA wird im Prozess der Translation durch Ribosomen in Proteine „umgewandelt“, Anm. d. Redaktion). Bereits 2020 veröffentlichten die Autoren eine Studie, welche subtile sensomotorische Defizite im Larvenstadium (120 h nach Befruchtung) beschreibt, vermutlich als Konsequenz von 3,5-GHz-Hochfrequenzbelastung. Das Ziel der hier besprochenen Studie war es, die langfristigen Auswirkungen auf das Verhalten, hervorgerufen durch kurzfristige Hochfrequenzbelastung zu verstehen.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Wissenschaftler bestrahlten die Eier des Zebrafärblings in einem speziellen, temperaturregulierten Faraday'schen

Käfig. Die Embryonen wurden 6–48 h nach Befruchtung mit 30–32 dBm bei 3,5 GHz Hochfrequenz belastet. Der berechnete SAR-Wert betrug 8,27 W/kg. Die Kontrollen wurden scheinbestrahlt (Transkriptomanalyse) bzw. nicht-bestrahlt (langfristige Verhaltensanalyse). Die Transkriptomanalyse, welche Veränderungen in der Ableserate von Genen untersucht, wurde unmittelbar nach Bestrahlungsende durchgeführt. Die Analyse der Hochfrequenzwirkung auf das Verhalten adulter Tiere fand 3 Monate nach der Befruchtung statt.

### Ergebnisse:

Das Ziel der Wissenschaftler war es, durch Transkriptomanalysen molekulare Marker zu identifizieren, welche in Zusammenhang mit den beobachteten sensomotorischen Defiziten der Studie von 2020 stehen könnten. Außerdem sollte überprüft werden, ob diese Defizite in späteren Lebensstadien fortbestehen. Die Bewertung der Transkriptomanalyse zeigte, dass unterschiedliche Stoffwechselprozesse zum Teil stark gestört waren. Zu diesen Stoffwechselprozessen gehören der Kohlenstoff-Stoffwechsel, der durch Folat vermittelte Ein-Kohlenstoff-Stoffwechsel, der Aminosäurestoffwechsel sowie die Biosynthese von Aminosäuren. Unter den different abgelesenen Genen war die Ableserate von *hnmpdl* (Gen, dessen Protein wichtig ist für prä-RNA-Verarbeitung und den RNA-Stoffwechsel) sowie *mkrn2* (Gen, dessen Protein bei Proteinmodifikation eine Rolle spielt) erhöht. Es wurden jedoch keine spezifischen Störungen von Signalwegen beobachtet, welche unmittelbar die sensomotorischen Störungen erklären könnten.

Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass die 3,5 GHz grundlegende Nukleinsäuresynthese und Stoffwechselwege beeinflussen, welche wiederum die zelluläre Homöostase und Entwicklung stören könnten. Um herauszufinden, ob eine kurzfristige Hochfrequenzbestrahlung während der Entwicklung anhaltende Verhaltensänderungen hervorrufen kann, wurde das Sozialverhalten, die Raubtiervermeidung sowie die Schreckreaktion von adulten Zebrafärblingen analysiert, welche während ihrer Entwicklung bestrahlt wurden. Bei der Untersuchung des Sozialverhaltens zeigten lediglich männliche Exemplare eine signifikante Veränderung nach Befeldung. Bei der Raubtiervermeidung war das Verhalten beider Geschlechter signifikant verändert. Bei der Schreckreaktion wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen befeldeten Exemplaren und Kontrollexemplaren festgestellt.

### Schlussfolgerungen:

Die Daten weisen darauf hin, dass Hochfrequenz Auswirkungen auf das Sozial- und Angstverhalten von adulten Zebrafärblingen haben könnte. Grund für diese, wenn auch subtile, Verhaltensstörung könnte die Kurzzeitbefeldung 3 Monate vor den Verhaltensanalysen sein. Die Untersuchung der zugrundeliegenden, molekularen Veränderungen weist auf Komponenten der Nukleinsäuresynthese sowie des Stoffwechsels hin.

Laut den Autoren könnten Störungen solcher wichtiger biochemischer Prozesse während der Entwicklung auch die neuronale Entwicklung beeinträchtigen. Als nächsten Schritt sehen die Wissenschaftler die Untersuchung von Langzeitbefindungen mit schneller Frequenzmodulation an, um die Nutzung von 5G-Mobiltelefonen bzw. den Aufenthalt in der Nähe von 5G-Infrastruktur realer abbilden zu können. (RH)



### Oxidative Wirkung von Hochfrequenz

## 1,8-GHz-Strahlung verändert ROS in menschlichen HEK293-Zellen als Funktion der Signalamplitude

Pooam M, Jourdan N, Aguida B, Dahon C, Baouz S, Terry C, Raad H, Ahmad M (2022): Exposure to 1.8 GHz radiofrequency field modulates ROS in human HEK293 cells as a function of signal amplitude. *Communicative & Integrative Biology*, 15:1, 54–66, DOI: 10.1080/19420889.2022.2027698

Die möglichen Folgen der zunehmenden Hochfrequenzstrahlung im GHz-Bereich für die Bevölkerung sind von hohem Interesse, werden aber kaum verstanden. Hier wird gezeigt, dass das Einwirken der 1,8-GHz-Trägerfrequenz der Telekommunikation im Bereich der im Haushalt auftretenden Feldstärken die Bildung von reaktiven oxidativen Substanzen (ROS) hervorruft. Da ROS in geringen Konzentrationen normale Stoffwechselforgänge regulieren, aber bei Stress in den Zellen erhöht gebildet werden, können signifikante Zellschäden an DNA, Proteinen und Fetten entstehen. Um die Mechanismen der positiven wie negativen Wirkungen zu erklären bzw. zu verstehen, wurden die Zellen nach nur 15 Minuten Einwirkung innerhalb von 3 Stunden untersucht.

### Studiendesign und Durchführung:

Für das Experiment wurden menschliche Embryonalzellen der Niere (Human embryonic kidney, HEK293) als Monolayer zur Bestrahlung eingesetzt. Das statische Magnetfeld im Inkubator betrug etwa 40  $\mu$ T, es gab scheinbestrahlte Kontrollen und bestrahlte Testproben, auf die das 1,8-GHz-Feld eines Signalgenerators 15 Minuten mit verschiedenen Intensitäten einwirkte. Die Antenne war 30 cm über den Proben installiert. Die Zellen wurden wie folgt behandelt: Kontrolle -96 dBm (Hintergrund), -67 dBm (sehr niedrig), -55 dBm (niedrig), -31 dBm (mittel) und -8,5 dBm (hoch). Es wurden 5 Doppelansätze pro Bedingung an 5 Tagen mit 5 neuen Zellkulturen durchgeführt. Die Temperatur war unverändert. Untersucht wurden die intrazelluläre ROS-Konzentration (Fluoreszenz Intensität), die Veränderungen der Stress-bezogenen Gene GPX-1, GPX-3, SOD2, NOX-2, GSR und

Katalase (3 unabhängige Ansätze), die Genexpression in den HEK392-Zellen als Reaktion auf 1,8 GHz, statisches (0,2  $\mu$ T) und gepulstes elektromagnetisches Feld (6 unabhängige Ansätze) und dazu die Genexpression von 7 Genen (KIAA1211, RSP16P5, TSA2R, DDX50, LINC01366, UTS2B, KRT79), von denen man weiß, dass sie von statischen und elektromagnetischen Feldern reguliert werden (3 unabhängige Wiederholungen pro Gen).

### Ergebnisse:

Die nicht-thermischen 1,8-GHz-Felder lösten nach 15 Minuten einen signifikanten Anstieg der ROS im Zellkern und im Zytoplasma der HEK392-Zellen aus. Besonders hoch (fast 3-fach erhöht gegenüber der Kontrolle) konzentrierten sich die ROS um den Zellkern herum in Vesikeln von Golgi-Apparat und dem Endoplasmatischen Retikulum. Die ROS-Ansammlung war nicht-linear mit der höchsten Dichte bei mittlerer Feldstärke. Dieses Ergebnis spricht gegen mechanischen oder thermischen Stress, denn dann gäbe es einen linearen Verlauf. Es scheint ein primärer, vielleicht Rezeptor-bedingter Prozess zu sein. Die relative Expression aller Gene für oxidativen Stress zeigte nach Bestrahlung eine schnelle Änderung. Bei allen Enzymen waren signifikante Unterschiede zur Kontrolle zu sehen, allerdings bei jedem Gen und jeder Feldstärke unterschiedlich und nicht-linear. Bei den Genen, die bekanntermaßen auf statische Magnetfelder und auf gepulste Felder ansprechen, waren bei unterschiedlichen Amplituden (-96 dBm bis -8,5 dBm) überwiegend signifikante und hochsignifikante Unterschiede zur Kontrolle sichtbar und es gab ebenfalls keine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung.

### Schlussfolgerungen:

Diese Experimente haben gezeigt, dass das Einwirken der 1,8-GHz-Felder von Telekommunikationsgeräten mit Feldstärken, die im normalen Umfeld vorkommen, eine direkte physiologische Wirkung auf zelluläre ROS-Biosynthese und Signalgebung haben können. Die Reaktion ist auf komplexe Weise abhängig von der Signalamplitude, die nicht linear, d. h. ohne Dosis-Wirkungs-Beziehung, mit signifikanten und hoch signifikanten Unterschieden zur Kontrolle erscheinen, aber auch mit Feldstärken, bei denen keine Reaktion erfolgt (blinde Flecken). Das deutet auf allgemeine Eigenschaften der Reaktionsmechanismen hin. Da ROS oxidativen Stress und zelluläre Signalgebung und Reaktionswege regulieren, liefern die Ergebnisse eine mögliche mechanistische Erklärung für die vielen verschiedenen bekannten physiologischen Wirkungen der Mikrowellen in der Literatur. Als Schlussfolgerung bleibt, dass die Modulation des intrazellulären ROS eine direkte Folge der Bestrahlung sein kann, abhängig von Signalfrequenz und Feldstärke. Da intrazelluläre ROS nützliche und schädliche (positive oder negative) Wirkungen haben, können diese Ergebnisse eine Erklärung für die vielen physiologischen Wirkungen der Mikrowellen liefern. (IW)



### Wirkung von 3,0 GHz auf Nervenzellen

## Änderungen der Erregbarkeit primärer Hippocampuszellen nach Bestrahlung mit hochfrequenten Feldern von 3,0 GHz

Echchgadda I, Cantu JC, Tolstykh GP, Butterworth JW, Payne JA, Ibey BL (2022): Changes in the excitability of primary hippocampal neurons following exposure to 3.0 GHz radiofrequency electromagnetic fields. Scientific Report 12, 350; <https://doi.org/10.1038/s41598-022-069>

Da bekannt ist, dass Hochfrequenzstrahlung positive wie negative Wirkungen auf das Gehirn haben kann, sollte nach den zugrunde liegenden Mechanismen geforscht werden. Diese Studie untersuchte Änderungen in der Nervenzellaktivität und synaptischen Plastizität, da bisher nur wenige Studien den Einfluss von Mikrowellen auf das Nervensystem und synaptische Übertragung untersucht haben. Frühere Studien haben ergeben, dass elektromagnetische Felder geringer Intensität (Ganzkörper-SAR  $\leq 4$  W/kg) die Hirnfunktionen beeinflussen können, abhängig von Intensität und Dauer der Einwirkung (positive oder negative Änderung des Lern- und Erinnerungsvermögens oder von Aufgabenlösungen). Für Lernen und Gedächtnis sind Aktivität und Plastizität der Nervenzellen sehr wichtig. Auch morphologische Veränderungen können auftreten, z. B. bei Anzahl und Wachstum der Neuriten. Da es weitere Forschung braucht, um die Mechanismen zu verstehen, wie elektromagnetische Felder in den Zellen wirken, wurden die Reaktionen von Nervenzellen auf das 60-minütige Einwirken von 3-GHz-Strahlung bei geringer Dosis (durchschnittlich  $\sim 0,3$  W/kg, maximal  $\sim 0,7$  W/kg) untersucht.

### Studiendesign und Durchführung:

Die Zellkulturen stammen von primären embryonalen Hippocampuszellen (PHNs) von Ratten, zur Bestrahlung wurden 40.000 Zellen/cm<sup>2</sup> pro Ansatz eingesetzt. Die Zellen wurden einem konstanten elektrischen Feld von 137 V/m ( $<1$  W/kg) über 60 Minuten bei 3,0 GHz ausgesetzt. Der durchschnittliche SAR-Wert betrug im gesamten Ansatz 0,1 (0,3–0,8) W/kg. Demzufolge wurde der Temperaturanstieg mit  $\sim 0,08$  bzw.  $0,2$  °C als nicht-signifikant bestimmt und mit Messungen bestätigt ( $\Delta T$  °C =  $0,11 \pm 0,03$  °C). Es wurden 3 unabhängige Ansätze ausgeführt. Die Bestimmung der Überlebensrate der Zellen wurde 24 Stunden nach Ende der Bestrahlung durchgeführt. Die Bestimmung der Calcium-Konzentrationen in den Zellen (Intensität der Fluoreszenz, quantitative Analyse) erfolgte unmittelbar vor der Bestrahlung bzw. der Scheinbestrahlung und nach den 60 Minuten Behandlung innerhalb von 15 Minuten. Die Bestimmung von Spannung und Strom an den Zellmembranen (Patch-Clamp-Elektrode) erfolgte innerhalb von 30 Minuten nach Bestrahlung bzw. Scheinbestrahlung.

### Ergebnisse:

Die Temperaturerhöhung war nach Bestrahlung im normalen physiologischen Bereich, daher vernachlässigbar, die Überlebensrate der Zellen war nicht vermindert. Die der Strahlung ausgesetzten Zellen zeigten eine statistisch signifikante Abnahme der Amplitude des ausgelösten Aktionspotenzials gegenüber den scheinbestrahlten Zellen ( $94,37 \pm 3,49$  mV,  $n=20$  zu  $82,42 \pm 4,11$  mV,  $n=20$ ). Dazu kam es zu einer signifikanten Depolarisation des Membran-Ruhepotenzials nach Bestrahlung ( $-68,36 \pm 1,27$ ,  $n=11$  mV zu  $-61,75 \pm 2,27$  mV,  $n=16$ ). Die Dauer des Aktionspotenzials war erhöht. Der Plasmamembran-Widerstand war nicht-signifikant verschieden. Die gesteigerte Depolarisation des Ruhepotenzials nach Bestrahlung deutet auf eine erhöhte Erregbarkeit der Zellmembranen hin; d. h., die Zellen erreichen die Schwelle früher und feuern bei geringerer Spannung. Das wurde bestätigt durch viel geringere Ströme, die das Aktionspotenzial auslösen. Die bestrahlten Zellen zeigten ein größeres synaptisches Potenzial mit einer großen Anzahl von spontanen Aktionspotenzialen (sAPs) im Vergleich zu den Kontrollzellen (40 % der Kontrollzellen feuerten 5 sAPs in 2 Minuten, während 100 % der bestrahlten Zellen 123 sAPs feuerten). Dieser Anstieg an sAPs nach Bestrahlung bestätigt die Annahme, dass HF-Bestrahlung zum Anstieg der Erregbarkeit von Nervenzellen führt. Die Amplituden des Aktionspotenzials, das Ruhepotenzial und die Schwelle der Depolarisation waren bei den bestrahlten Zellen geringer als bei den Kontrollzellen.

Die intrazellulären Calcium-Ionen-Konzentrationen (Mittelwert von  $n=48$  Zellen) sind bei den bestrahlten Zellen hochsignifikant gesteigert. Der Einstrom von Calcium-Ionen in die Zelle ist ein wichtiger Mechanismus bei der Regulation des Membranpotenzials, wobei die Änderungen des Membranpotenzials die Erregbarkeit der Zelle, die Ausschüttung von Neurotransmittern und die synaptische Plastizität kontrollieren. Diese Regulation ist abhängig vom Aktionspotenzial. Wenn das Aktionspotenzial das Nervenende erreicht hat, wird der spannungsempfindliche Ca<sup>2+</sup>-Ionenkanal geöffnet und das Ca<sup>2+</sup> strömt in die Zelle.

Zur Erfassung der Wirkung von 3,0-GHz-Strahlung auf die Übertragung an den Synapsen wurden die post-synaptischen exzitatorischen und inhibitorischen Ströme gemessen. Die Messungen bestätigten, dass die Strahlung das Feuern der spontanen Aktionspotenziale dramatisch steigert. Die synaptische Übertragung wird durch die 3,0-GHz-Strahlung geringer Intensität potenziert.

### Schlussfolgerungen:

Die Bestrahlung mit 3,0 GHz geringer Intensität veränderte 15 Minuten nach Ende der 60-minütigen Bestrahlung deutlich die Aktivität der Nervenzellen, d. h. die Erregbarkeit der embryonalen Hippocampuszellen war auf nicht-thermische Weise verändert. Vor allem erzeugte die Strahlung eine signifikante Depolarisation des Ruhepotenzials und eine signifikante Abnahme der Amplitude des Aktionspotenzials, das von einem Anstieg der



Ca<sup>2+</sup>-Ionen in der Zelle begleitet war und die synaptische Übertragung wurde durch die 3,0-GHz-Strahlung potenziert. Diese Befunde deuten auf die Möglichkeit veränderter Gehirnfunktion hin. Die Wirkung der Strahlung auf Erregbarkeit der Hippocampuszellen, den Calciumspiegel und die synaptische Übertragung zeigt, dass mehr Forschung betrieben werden muss, um die zugrunde liegenden Mechanismen der EMF-Wirkung zu verstehen. (IW)



### DNA-Schäden: Mobilfunk im Vergleich zu Niederfrequenz

## Vergleich von DNA-Schäden, die durch Mobiltelefonie und andere Arten von anthropogenen elektromagnetischen Feldern verursacht werden

Panagopoulos, D. J. (2019). Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 781, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2019.03.003>

Durch elektromagnetische Felder (EMF) bedingte Auswirkungen auf die DNA und die Fortpflanzung wurden bei einer Vielzahl von Tieren festgestellt und weisen bemerkenswerte Ähnlichkeiten auf. Eine 2019 erschienene Übersichtsarbeit – eine Zusammenfassung von Studien, die zwischen 2006 und 2016 veröffentlicht wurden – vergleicht die durch sechs verschiedene EMF induzierte DNA-Fragmentierung am gleichen biologischen System, der Eikammer von *Drosophila melanogaster*. Getestet wurden zwei Arten von Mobiltelefonen (GSM 900 und 1800 MHz), 50-Hz-niederfrequente EMF (NF-EMF) bei Feldstärken von 0,1, 1,1 und 2,1 mT (bzw. 1, 11 und 21 G) sowie ein gepulstes elektrisches Feld (PEF, 400 kV/m). Es gibt nur wenige Studien, die niederfrequente mit hochfrequenten Feldern des Mobilfunks vergleichen. Der direkte Vergleich der Auswirkungen von Mobilfunk und NF-EMF auf dasselbe biologische Modell unter identischen Bedingungen und Verfahren ist wichtig, da NF-EMF von Stromleitungen ausgehen, welche lange vor dem Mobilfunk als krebserregend klassifiziert wurden, und beide Arten von EMF als mögliche Karzinogene eingestuft werden. Die empfindlichsten Entwicklungsstadien während der Oogenese sind das Keimblatt, und die Stadien 7–8, die als „mittlerer Oogenese-Kontrollpunkt“ bezeichnet werden. Es ist bekannt, dass beide Kontrollpunkte der Oogenese sehr empfindlich auf Stressfaktoren wie schlechte Ernährung oder die Exposition gegenüber zytotoxischen Chemikalien reagieren.

### Es zeigte sich, dass Mobilfunkstrahlung weitaus schädlicher ist als 50-Hz oder PEF.

#### Studiendesign und Durchführung:

*Drosophila-Fruchtfliegen* wurden in Gruppen von zehn Männchen und zehn Weibchen in Standard-Laborglasfläschchen gesetzt. Die Exposition mit EMF begann am Tag des Schlüpfens und dauerte insgesamt 120 Stunden (5 Tage). Die Nettodauer der Exposition und die Bestrahlungsintensitäten waren wie folgt: a) Exposition mit GSM 900 oder 1800 für 6 min alle 24 h (36 min insgesamt) mit dem Mobiltelefon im „Sprech“-Modus und in Kontakt mit den Fläschchen (HF-Strahlungsintensität ~0,38 mW/cm<sup>2</sup> für GSM 900 und ~30 % niedriger Wert für GSM 1800). b) Exposition mit 50 Hz (1 oder 11 oder 21 G) kontinuierlich für 5 Tage (insgesamt 120 h) mit speziell hierfür entwickelten Spulen. c) Exposition mit PEF (44,4 Hz Pulsfrequenz, 400 kV/m) für 30 min alle 2 h während 5 Tagen (30 h insgesamt). Anschließend wurden die Eikammern der Weibchen entnommen und ein TUNEL-Assay durchgeführt. Der TUNEL-Assay ist ein bekannter Marker für DNA-Fragmentierung (schwere DNA-Schäden einschließlich Einzel- und Doppelstrangbrüchen). Die Markierung, die an den geschädigten Stellen der DNA eingebaut wird, wurde durch Fluoreszenzmikroskopie sichtbar gemacht.

#### Ergebnisse:

Es zeigte sich, dass Mobilfunkstrahlung weitaus schädlicher ist als 50-Hz oder PEF. Der Mobilfunk war selbst bei sehr viel kürzerer Expositionsdauer deutlich bioaktiver als die anderen EMF und die zuvor getesteten zytotoxischen Chemikalien. Der entscheidende Parameter für die intensive Bioaktivität scheint die extreme Variabilität der polarisierten Mobilfunk-Signale zu sein, hauptsächlich aufgrund der großen unvorhersehbaren Intensitätsänderungen. Es wurde festgestellt, dass Mobilfunk-EMF signifikant gefährlicher sind als die anderen Arten von EMF. GSM 900- oder GSM 1800-Strahlung mit einer Gesamtexpositionsdauer von je 36 min induzierte eine DNA-Fragmentierung in 50,2 % bzw. 35,8 % der Eikammern in den Eierstöcken der exponierten Weibchen. Die entsprechenden Prozentsätze für 1, 11 und 21 G NF-EMF betragen 5,7–7,5 % bei einer Expositionsdauer von 120 h, sowie für PEF 2,7 % bei einer Expositionsdauer von 30 h. Die Magnetfeldintensität, die in nächster Nähe zu den stärksten Hochspannungsleitungen gemessen wird, liegt in der Regel deutlich unter 1 G oder 0,1 mT. Es wurde festgestellt, dass die Strahlungsexposition durch Mobiltelefone während des normalen „Sprech“-Modus die DNA-Fragmentierung nicht nur an den beiden Kontrollpunkten, sondern, im Gegensatz zu zytotoxischen Chemikalien und niederfrequenten EMF, in allen Entwicklungsstadien und darüber hinaus in allen drei Typen von Eikammerzellen induziert.

#### Schlussfolgerung:

Die DNA-Fragmentierung in der Eikammer kann, wenn nicht zum Zelltod, so doch zu vererbaren Mutationen führen. Dies kann weitaus gefährlicher sein als eine Verringerung der Nach-

kommenschaft, da sie zu Tumoren oder mutierten Organismen führen kann. Es wurde festgestellt, dass die NF-EMF und die PEF eine DNA-Fragmentierung in mehr oder weniger vergleichbarem Ausmaß wie die nicht-elektromagnetischen Agenzien hervorrufen. Die beobachtete DNA-Fragmentierung ist eine indirekte Wirkung, da die in der vorliegenden Studie verglichenen EMF nicht ionisierend sind. Die indirekte Wirkung auf die DNS kann durch Freisetzung von oxidativen freien Radikalen in der Zelle hervorgerufen werden, die z.B. nach einer unregelmäßigen Steuerung von spannungsgesteuerten Ionenkanälen durch EMFs auftreten können. Es ist vernünftig anzunehmen, dass eine zelluläre Wirkung, die durch EMF auf *Drosophila* verursacht wird, auch im menschlichen Organismus zu erwarten ist. Der Vorteil bei der Untersuchung der Wirkung auf *Drosophila* ist der viel kürzere Lebenszyklus, aufgrund dessen eine Wirkung innerhalb weniger Stunden oder Tage beobachtet werden kann.

Lebende Organismen waren im Laufe der biologischen Evolution ständig statischen, elektrischen und magnetischen Feldern der Erde ausgesetzt. Während bei normaler Exposition gegenüber diesen natürlichen Umgebungsfeldern keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit zu erwarten sind, werden Schwankungen ihrer Intensität in der Größenordnung von ~20 % während „geomagnetischen Stürmen“, die auf periodische Veränderungen der Sonnenaktivität zurückzuführen sind, mit erhöhten Raten von Gesundheitsstörungen bei Mensch und Tier in Verbindung gebracht, darunter Nerven- und psychische Erkrankungen, hypertensive Krisen, Herzinfarkte, zerebral bedingte Unfälle und Todesfälle. Da lebende Organismen keinen Schutz gegen Schwankungen in der Größenordnung von ~20 % der natürlichen EMF haben, ist es realistisch zu erwarten, dass sie keinen Schutz gegen EMF besitzen, die unvorhersehbar und zu ~100 % schwanken. Daraus ergibt sich, dass die Variabilität der EMF-Exposition ein äußerst wichtiger Faktor ist, damit die spezifische Art der polarisierten EMF gesundheitliche Wirkungen hervorrufen kann. Mit jeder neuen Generation von Telekommunikationsgeräten (z. B. Mobiltelefone der 3., 4. und 5. Generation oder jeweilige Basisstationen) steigt die Menge der in jedem Augenblick übertragenen Informationen, was zu einer größeren Variabilität und Komplexität der Signale führt, an die sich die lebenden Zellen/Organismen noch weniger anpassen können. Dieser für die biologische Aktivität und den Schutz der öffentlichen Gesundheit wichtige Punkt sollte durch einen direkten Vergleich der Auswirkungen zwischen simulierten und realen HF-EMF experimentell weiter bestätigt werden. (AT)

1. Ikeya, N., & Woodward, J. R. (2021). Cellular autofluorescence is magnetic field sensitive. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(3), e2018043118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018043118>
2. Chae, K. S., Kim, S. C., Kwon, H. J., & Kim, Y. (2022). Human magnetic sense is mediated by a light and magnetic field resonance-dependent mechanism. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12460-6>
3. Price, C., Williams, E., Elhalel, G., & Sentman, D. (2021). Natural ELF fields in the atmosphere and in living organisms. *International Journal of Biometeorology*, 65(1), 85-92. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01864-6>
4. Panagopoulos, D. J. (2019). Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 781, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2019.03.003>



### THz-Strahlung und Calciumkanäle

## Theoretische Untersuchung zur Wirkung von Terahertz-Strahlung auf den Calciumtransport in den Calciumkanälen

Guo L, Bo W, Wang K, Wang S, Gong Y (2022): Theoretical investigation on the effect of terahertz wave on Ca<sup>2+</sup> transport in the calcium channel. *iScience* 25 (1), <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103561>

Die Frage, ob Terahertz (THz)-Strahlung die Ionenkanäle von Nervenzellen beeinflusst und weitere Reaktionen hervorruft, hat viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Ca<sup>2+</sup>-Ionen und Ca<sup>2+</sup>-Kanäle spielen eine wichtige Rolle bei vielen physiologischen und biologischen Prozessen, von Kontraktionen des Herzmuskels und anderer Muskeln über Signalgebung (Impulse) im Nervensystem bis zur Transkription von Genen. Deshalb ist es wichtig, den genauen Feedback-Mechanismus zu wissen, der den Ca<sup>2+</sup>-Ionen den Eintritt in die Zellen ermöglicht. Man kennt elektrische Stimulationen und solche, die durch Licht, Geräusche, Schmerz und Druck erzeugt werden, die dann den Ionen-transport durch die Membran auslösen. Es gibt aber nur wenig Wissen über Stimulation des Ionen-Transports durch elektromagnetische Felder. Die Biophotonen, die bei verschiedenen oxidativen Stoffwechselprozessen erzeugt werden, entstehen im THz-Bereich. Ein Organismus hat also eine Fülle von THz-Informationen.

THz-Wellen haben viele mögliche Anwendungen in der Biophysik, sie können eingesetzt werden zur Analyse des Finger-Print-Spektrums von biologischen Materialien, den Protonen-transfer in den Wasserstoffbrücken der Basenpaare stimulieren und das Entwinden der DNA-Moleküle beschleunigen. Nervenfasern können als dielektrische Wellenleiter betrachtet werden, die THz- und Infrarot-Wellen übertragen. Aus anderen Studien weiß man, dass THz-Wellen die Nervenaktivität regulieren und die Permeabilität der spannungsgesteuerten Calciumkanäle steigern können. Das geschieht durch Beeinflussung der entsprechenden chemischen Bindungen von -COO<sup>-</sup> oder -C=O. Die Frage ist, ob die wandernden Ionen in den Kanälen die THz-Wellen erzeugen können und ob diese spontanen Wellen durch Strahlung von außen während der Wanderung in den Kanälen beeinflusst werden können.

Im Nervensystem gibt es elektromagnetische Signale von THz bis Infrarot. Erkenntnisse zur Wirkung von THz-Wellen auf den Einstrom der Ionen in den Ca<sup>2+</sup>-Kanal können Hinweise liefern, wie ein falscher Leitungsprozess der Ca<sup>2+</sup>-Ionen in normalen Zellen korrigiert werden kann, oder um die Apoptose schnell einzuleiten bei unerwünschten Zellen wie Krebszellen, um durch erhöhten Ca<sup>2+</sup>-Einstrom einen Ca<sup>2+</sup>-Überschuss zu erlangen.

**Studiendesign und Durchführung:**

Die Forscher untersuchten am Modell des spannungsgesteuerten Calciumkanals die spontane Strahlung, die bei der Bewegung der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen in den Calciumkanälen erzeugt wird, und im Vergleich dazu die Wirkung von externer THz-Strahlung auf den Transport der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, indem 1. das mathematisch-physikalische Modell durch die Brown'sche Dynamik simuliert wurde, 2. der Einfluss der Temperatur und der Anzahl der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen auf die durch die Bewegung im Kanal erzeugte THz-Strahlung und 3. die Regulation des externen THz-Feldes auf die Bewegung einzelner oder mehrerer Ionen, um den theoretisch vorausgesetzten Einfluss des THz-Feldes auf die Erzeugung und Weiterleitung der Aktionspotenziale zu erkunden.

**Ergebnisse:**

Die Ergebnisse zeigen, dass eine plötzliche Änderung des Signals den Transport des  $\text{Ca}^{2+}$ -Ions durch die Membran bewirkt; das spontane Strahlungsspektrum ist hauptsächlich im THz-Bereich konzentriert. Gesichert ist, dass die Änderung der Temperatur und die Anzahl der Ionen im Kanal signifikante Wirkungen auf die spektralen Charakteristiken haben. Wenn die Frequenz steigt, verschiebt sich das Strahlungsspektrum der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen zu höheren Frequenzen. Zudem wird unter einem externen THz-Feld das Schwingungsspektrum der bestrahlten  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen signifikant gesteigert. Die Simulationen haben auch gezeigt, dass der Transport der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen durch den Ionenkanal von Frequenz und Amplitude der THz-Welle abhängt. Bei einer bestimmten Amplitude steigt die Ionen-Permeabilität allmählich, wenn die Frequenz des THz-Feldes steigt; bei einer bestimmten Frequenz steigt die Ionen-Permeabilität, wenn die Amplitude ansteigt. Wenn die Frequenz steigt wird gleichzeitig die Anzahl der wandernden Ionen signifikant erhöht, was darauf deutet, dass ein THz-Feld hoher Frequenz leitfähiger ist und so der  $\text{Ca}^{2+}$ -Einstrom durch die Membran reguliert wird.

**Schlussfolgerungen:**

Das hier entwickelte mathematisch-physikalische Modell für den  $\text{Ca}^{2+}$ -Kanal basiert auf der Brown'schen-Dynamik-Methode. Die Ergebnisse zeigen, dass das transportierte  $\text{Ca}^{2+}$ -Ion in einem  $\text{Ca}^{2+}$ -Kanal elektromagnetische Strahlung erzeugen kann, dessen Spektrum im Bereich von 16,9 THz konzentriert ist. Die Untersuchungen zeigten zudem, dass externe THz-Strahlung den  $\text{Ca}^{2+}$ -Transport durch den  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionenkanal beschleunigen kann. Wenn die Temperatur erhöht wird, ist die Bewegung der Ionen beschleunigt und das Strahlungsspektrum der  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen verschiebt sich zu höherer Frequenz. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern eine theoretische Basis für zukünftige Betrachtung der THz-Wellen und für Behandlungen mit THz-Wellen im Bereich der Neurologie. Nach Ansicht der Autoren zeigen die Ergebnisse dieser theoretischen Arbeit, dass mehr Forschung nötig ist, um die Mechanismen zwischen den THz-Wellen und den Ionenkanälen aufzuklären. (IW)

**Magnetsinn des Menschen****Der menschliche Magnetsinn wird durch einen licht- und magnetfeldresonanz-abhängigen Mechanismus vermittelt**

Chae, K. S., Kim, S. C., Kwon, H. J., & Kim, Y. (2022). Human magnetic sense is mediated by a light and magnetic field resonance-dependent mechanism. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12460-6>

Koreanische Forscher zeigen in einem neuen ausgeklügelten Versuch, dass der Mensch einen funktionsfähigen lichtabhängigen Magnetfeldrezeptor in seinen Augen besitzt. Zahlreiche Organismen nutzen ihren Magnetsinn als sensorischen Anhaltspunkt für die Wanderung, die Ausrichtung des Körpers oder die Nahrungssuche. Trotz einiger widersprüchlicher Berichte wurde bislang allgemein angenommen, dass der Mensch keinen Magnetsinn besitzt. Aus Tierversuchen ist bekannt, dass lichtabhängige Radikalpaare in Cryptochrom-Flavoproteinen in den Augen von Vögeln für deren Magnetsinn verantwortlich sind. Die Forschung zur Magnetorezeption beim Menschen ist sehr begrenzt. Es wird weithin angenommen, dass das statische Magnetfeld der Erde vom Menschen nicht wahrgenommen wird, während magnetische Wechselfelder, wie z.B. niederfrequente elektromagnetische Felder (EMF) und gepulste Felder, negative Auswirkungen auf die Gesundheit bzw. therapeutische Anwendungen haben können. Zwei neuere Studien mit unterschiedlichen experimentellen Ansätzen belegen jedoch einen menschlichen Magnetsinn. In einem Drehstuhlexperiment waren ausgehungerte Männer, nicht aber Frauen, in der Lage, sich in Abhängigkeit von blauem Licht in eine bestimmte magnetische Richtung zu orientieren, die zuvor mit Nahrung in Verbindung gebracht worden war (Chae 2019). Diese Studie legt nahe, dass sich die Magnetorezeptoren in den Augen befinden. Im Gegensatz dazu zeigte eine andere Studie, welche Elektroenzephalographie verwendete, dass bei einigen menschlichen Probanden in der Dunkelheit eine Abnahme der Alpha-Hirnwellenaktivität auftrat (Wang 2019). Die beobachtete Empfindlichkeit gegenüber der Polarität der angelegten Magnetfelder deutet auf einen Mechanismus auf Magnetitbasis hin.

**Studiendesign und Durchführung:**

Um die Existenz und den zugrundeliegenden Mechanismus des menschlichen Magnetsinns festzustellen, haben die Autoren die magnetische Orientierung bei Männern untersucht, indem die Drehstuhlmethode mit einem Zwei-Alternativen-Forced-Choice-Paradigma (2-AFC) kombiniert wurde. Vor dem Experiment wurden die Probanden 18–20 Stunden hungern gelassen. Um die Probanden mit verschiedenen Erdmagnetfeld-ähnlichen Magnetfeldern zu versorgen (d.h. durch Modulation der Gesamtintensität, der Neigung oder der Richtung des magnetischen Nordens), wurde ein Spulensystem aus drei doppelt gewickelten,

orthogonalen, rechteckigen Helmholtz-Spulen (etwa 2 x 2 m) benutzt. Die Versuchsperson saß auf einem drehbaren Kunststoffstuhl in der Mitte der dreidimensionalen Spulen, wobei sich ihr Kopf im mittleren Bereich der vertikalen Achse der Spulen befand. Am Anfang jedes Experiments wurde der Proband in Richtung des magnetischen Nordens gedreht und es wurde ihm ein Schokoladenchip gegeben, den er innerhalb von 30 s essen durfte („mit Nahrungsmittelassoziation“, 16 Durchläufe pro Proband), oder es wurde kein Schokoladenchip gegeben (weitere 16 Durchläufe pro Proband). Daraufhin wurde der magnetische Norden innerhalb des Dreispulensystems zufällig um entweder 90 oder 180 Grad in Uhrzeigerichtung gedreht, und der Proband musste die neue Nordrichtung „erfühlen“.

Es wurde auch getestet, ob niederfrequente EMF mit bestimmten Frequenzen die magnetische Orientierung beim Menschen stören, was weitere Schlüsse erlaubte.

### Ergebnisse:

Die magnetische Orientierung der Probanden war empfindlich gegenüber der Wellenlänge des einfallenden Lichts und hing entscheidend davon ab, ob blaues Licht die Augen erreichte. Die Versuchspersonen wurden in Abhängigkeit vom Nahrungsmittelkontext als unterschiedlich magnetisch orientiert eingestuft und daraufhin in zwei Gruppen unterteilt. Gruppe 1 zeigte höhere Orientierungsfähigkeit als zufällig erwartet im hungerten Zustand bei Anwesenheit von Blaulicht, Gruppe 2 jedoch schlechtere Orientierungsfähigkeit als zufällig erwartet unter gleichen Umständen. Gruppe 2 zeigte jedoch überdurchschnittlich gute Orientierungsfähigkeit im Dunkeln. Unter einer Erdmagnetfeld-Bedingung von nahezu Null während der Assoziationsphase zeigte keine der beiden hungernden Gruppen einen signifikanten Unterschied in der Rate der korrekten Orientierung mit und ohne Nahrungsmittelassoziation. Wurden die Probanden hingegen normal ernährt, zeigte die Gruppe 1, nicht aber die Gruppe 2, eine signifikante Abnahme der korrekten Orientierungsrate. Blaues Licht allein reichte aus, um die Erfolgsrate bei ausgehungerten Probanden der Gruppe 1 zu erhöhen.

Ein niederfrequentes EMF bei 1,26 MHz, der Elektronen-Larmorfrequenz im umgebenden Erdmagnetfeld, wurde auf Probanden angelegt, die eine korrekte Orientierungsrate von mehr als 0,5 gezeigt hatten. 1,26 MHz, aber nicht 1,89 MHz, störten die magnetische Orientierung im Vergleich zur Kontrolle signifikant. Als die Stärke des statischen Magnetfeldes um 50 % auf 67,5  $\mu\text{T}$  erhöht wurde, so dass die Larmor-Frequenz 1,89 MHz betrug, wurde festgestellt, dass das 1,89-MHz-Feld, aber nicht das 1,26-MHz-Feld, die Rate der korrekten Orientierung signifikant reduzierte.

### Schlussfolgerung:

Die magnetische Reaktion auf blaues Licht entspricht in etwa dem Absorptionsspektrum von vollständig oxidiertem FAD in Cryptochrom (Wellenlängen unter 500 nm), und es wur-

de berichtet, dass Cryptochrome in der menschlichen Retina vorkommen, was darauf hindeutet, dass Cryptochrome Magnetorezeptoren beim Menschen sind. Zum Verständnis der komplizierten lebensmittelkontext- und gruppenabhängigen Orientierungsprofile wird Folgendes vorgeschlagen: freie Radikale, z. B. reaktive Sauerstoffspezies wie  $\text{O}_2^-$ , treten aufgrund unterschiedlicher Stoffwechselraten in verschiedenen Konzentrationen auf, abhängig von Hunger, Körpergewicht oder exponierten Magnetfeldern.

Auf den ersten Blick sind die Hauptergebnisse dieser Studie, d.h. die durch blaues Licht und den Radikalpaar-Mechanismus vermittelte magnetische Orientierung, nur schwer mit den Ergebnissen von Wang et al. 2019 in Einklang zu bringen, die einen lichtunabhängigen, auf Magnetit basierenden Mechanismus für den menschlichen Magnetsinn darlegen. In den beiden Studien wurden jedoch sehr unterschiedliche experimentelle Ansätze verwendet, die möglicherweise unterschiedliche Rezeptoren untersuchen. Dies könnte mit Vögeln verglichen werden, von denen man annimmt, dass sie Radikalpaare in den Augen (für die Richtungswahrnehmung) und Magnetit anderswo (für die Intensitätswahrnehmung) verwenden. Diese Ergebnisse belegen die Existenz eines menschlichen Magnetsinns und deuten auf einen zugrundeliegenden quantenmechanischen Magnetorezeptionsmechanismus hin. (AT)



## Natürlicher Elektromagnetismus und Biorhythmen

### Natürliche niederfrequente Felder in der Atmosphäre und in lebenden Organismen

Price, C., Williams, E., Elhalel, G., & Sentman, D. (2021). Natural ELF fields in the atmosphere and in living organisms. *International Journal of Biometeorology*, 65(1), 85-92. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01864-6>

Die zelluläre elektrische Aktivität bei Wirbeltieren und wirbellosen Tieren tritt bei extrem niedrigen Frequenzen (NF) auf, mit charakteristischen Maxima unter 50 Hz. Der Ursprung dieser Frequenzmaxima war bislang unbekannt. Eine der grundlegenden Fragen insbesondere in der Hirnforschung ist, warum Organismen charakteristische NF-Oszillationen der elektrischen Aktivität aufweisen. Es ist erstaunlich, dass viele verschiedene Arten eine ähnliche elektrische Wellenaktivität aufweisen, unabhängig von ihrer Gehirngröße, der Komplexität des Gehirns oder sogar dem Vorhandensein einer Hirnrinde. Zooplankton in den Ozeanen weist eine elektrische Aktivität auf, die ihren Höhepunkt zwischen 7 und 14 Hz erreicht. Seelöwen, Schlangen, Haie und Kraken zeigen ebenfalls Spektren, die hauptsächlich unter 50 Hz liegen, ebenso der Mensch. Interessant ist die dominante Spitze bei 8 Hz in allen Beispielen.

Die typische elektrische Aktivität der Hirnrinde beim Men-

schen tritt in einem Frequenzbereich unter 50 Hz auf, wobei Alphawellen (8–13 Hz) für Entspannung, Betawellen (14–25 Hz) für normalen wachen Geisteszustand stehen, Gamma-Wellen (30–100 Hz) mit Wahrnehmung und Bewusstsein verbunden sind, Delta-Wellen (0,5–4 Hz) charakteristisch für Tiefschlaf sind und Theta-Wellen (4–8 Hz) für Kreativität und Träume. Untersuchungen am Menschen haben gezeigt, dass sich die Gehirnaktivität mit zunehmender Menge an Halothan (Narkosemittel) von den normalen 10-Hz-Alpha-Signalen auf ein vorherrschendes 7–8 Hz-Signal verschiebt.

### Schumann-Resonanz

Die Schumann-Resonanzen (SR) sind eine Reihe von Spektrumsspitzen im NF-Teil des elektromagnetischen Spektrums der Erde. Schumann-Resonanzen sind globale elektromagnetische Resonanzen, die durch Blitzentladungen in dem von der Erdoberfläche und der Ionosphäre gebildeten Hohlraum erzeugt und angeregt werden. Im Spektrum dominant sind die ersten drei Resonanzen, bei 7,8 Hz, 14 Hz sowie 20 Hz. Das SR-Spektrum variiert in Amplitude und Frequenz je nach Tageszeit, Jahreszeit und relativer Lage auf der Erde im Vergleich zu den Gewitterregionen. Die Ionosphäre, und damit der für die Erzeugung der SR notwendige Wellenleiter, wird durch energiereiche Sonnenstrahlung aufrechterhalten, die in der oberen Atmosphäre Ionen und freie Elektronen erzeugt, die zur Reflexion elektromagnetischer Wellen im ENF-Bereich führen. Daher ist es wahrscheinlich, dass die Schumann-Resonanzen seit dem Beginn des Lebens auf unserem Planeten existieren, d. h. Mindestens 2–3 Milliarden Jahre.

### Stochastische Synchronisation und Resonanz

Könnten Lebewesen dieses natürliche Feld genutzt haben, um ihren eigenen Subsysteme zu synchronisieren? Unter den zahlreichen nichtlinearen Effekten in der Natur ist die Synchronisation das Phänomen, das wahrscheinlich am häufigsten beobachtet wird. In biologischen Systemen kann die Synchronisation von der mikroskopischen Ebene von Zellpopulationen und einzelnen Neuronen bis hin zu großen Netzwerken, der menschlichen kardiorespiratorischen Dynamik und sogar dem Verhalten großer Populationen lebender Organismen reichen. Obwohl die Idee der stochastischen Synchronisation verlockend klingt, sind die Schumann-Resonanzfelder in der Atmosphäre extrem schwach. Die Amplitude der Magnetfelder wird in Pikotesla ( $1 \text{ pT} = 10^{-12} \text{ Tesla}$ ) gemessen, 10 Millionen Mal schwächer als das quasi-statische Erdmagnetfeld, während die elektrischen Felder in der Größenordnung von mV/m liegen.

Stochastische Resonanz tritt auf, wenn ein nichtlineares System einem schwachen periodischen Signal ausgesetzt ist, das normalerweise nicht nachweisbar ist, aber durch ein Resonanzphänomen zwischen dem stochastischen Rauschen und dem schwachen periodischen Signal nachweisbar wird. Frühe Studien zur stochastischen Resonanz haben gezeigt, dass zunehmende Hintergrundgeräusche häufig zu einer Erhöhung der gesuchten

Ausgangssignalstärke führen. Das Rauschen kann zufällig oder systematisch sein. Im Allgemeinen verstehen wir unter Rauschen eine Störung der Übertragung und Erkennung von Signalen. Die stochastische Resonanz bewirkt jedoch das Gegenteil. Tatsächlich kann die Zugabe einer angemessenen Menge an Rauschen ein Signal verstärken und somit zu seiner Erkennung in einer verrauschten Umgebung beitragen. Aufgrund ihrer Robustheit und Einfachheit wird die stochastische Resonanz in vielen Bereichen des Lebendigen genutzt.

### Schlussfolgerung:

Die Autoren schlagen vor, dass die natürlichen elektromagnetischen Resonanzfrequenzen in der Atmosphäre, die kontinuierlich durch die globale Blitzaktivität erzeugt werden, über Milliarden von Jahren während der Evolutionsgeschichte die elektrischen Hintergrundfelder für die Entwicklung der zellulären elektrischen Aktivität lieferten. Die Forschergruppe der Autoren hat kürzlich auch signifikante Auswirkungen von 7,8-Hz-Magnetfeldern auf Herzmuskelzellen von Ratten nachgewiesen. Es ist anzumerken, dass die Feldstärke (zwischen 20 pT und 200 nT) keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte, während die Frequenz eine wichtige Rolle spielte.

Viele Spezies (vom Zooplankton bis zum Menschen) zeigen elektrische Aktivität im NF-Bereich unter 50 Hz, wobei sich signifikante Maxima in ihren Leistungsspektren auf bestimmte Frequenzen konzentrieren. Diese Frequenzen weisen eine überraschende Ähnlichkeit mit den natürlichen NF-Spektren in der Atmosphäre auf, die durch Blitze erzeugt werden. Zu den Mechanismen, die eine solche Beziehung erklären können, gehören stochastische Synchronisation und stochastische Resonanz. Die hier besprochenen Studien zeigen, dass sehr schwache magnetische Wechselfelder biologische Prozesse beeinflussen. Leider fehlt bislang ein physikalischer Mechanismus zur Erklärung dieser Befunde. Das Haupthindernis bei der Aufdeckung der physikalischen Erklärung ist die extrem schwache Amplitude der in den Experimenten verwendeten Magnetfelder mit einer Energie, die viel niedriger als das thermische Rauschen ist. (AT)



### Mechanismen des Magnetsinns

## Die zelluläre Autofluoreszenz ist magnetfeldempfindlich

Ikeya, N., & Woodward, J. R. (2021). Cellular autofluorescence is magnetic field sensitive. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(3), e2018043118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018043118>

Forscher der Universität Tokyo haben nun den direkten Beweis erbracht, dass Magnetfelder im Millitesla-Bereich *in vivo* zu che-

mischen Reaktionen führen, die durch Fluoreszenzmikroskopie zu beobachten sind. Hierbei wurde Flavin als das direkt durch Magnetfelder in seinen Elektronenspin-Eigenschaften veränderte Molekül identifiziert. (Anmerkung der Redaktion: Flavin ist Bestandteil von Riboflavin (Vitamin B<sub>2</sub>), Flavin-Mononukleotid und Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD), wichtige Energietransfermoleküle im Zellmetabolismus und Koenzyme von vielen Enzymen.) Flavin findet sich auch eingebettet in das magnetosensible Protein Cryptochrom, welches in den Augen und dem „Uhrzentrum“ von Tieren lokalisiert ist, und ist Teil der bakteriellen Photolyasen (lichtaktivierte DNS-Reparaturenzyme).

Bisher haben Studien zwei Schlüsselphänomene identifiziert, die biologische Wirkungen magnetischer Felder erklären könnten. Epidemiologische Studien haben potenziell schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit festgestellt, insbesondere einen robusten Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber niederfrequenten elektromagnetischen Feldern und Leukämie im Kindesalter, und verhaltensbiologische Studien haben die Magnetorezeption von Tieren untersucht. (Anmerkung der Redaktion: Eine starke Hypothese zur Erklärung dieser Phänomene ist der Radikalpaar-Mechanismus (RPM), ein komplizierter quantenphysikalischer Prozess, der eine Formwandlung der Elektronenwolke eines Moleküls durch schwache Magnetfelder, nach einer vorherigen Anregung durch Licht, beschreibt.) Da die Überprüfung dieser Hypothese mit Elektronenspineffekten verbunden ist, wurde der größte Teil der Grundlagenforschung von Chemikern und Physikern durchgeführt, und fällt in den Bereich der Quantenbiologie.

### Studiendesign und Durchführung:

HeLa-Zellen wurden unter einem speziell angefertigten Lichtmikroskop beobachtet, welches eine 450-nm blaue Laserdiode und einen Vektorfeld-Elektromagneten umfasst. Der Elektromagnet kann ein Magnetfeld beliebiger Richtung erzeugen, und wurde mit einem Dreieckswellen-Signal bei 0,05–0,25 Hz betrieben. Die Fluoreszenzspektren von FAD und von einzelnen HeLa-Zellen wurden mit einem Spektrometer gemessen, welches an das Mikroskop angeschlossen war.

### Ergebnisse:

Es wurde durch direkte, bildgebende Einzelzellmessungen gezeigt, dass die endogene Autofluoreszenz in HeLa-Zellen empfindlich auf die Anwendung externer Magnetfelder von 25 mT und weniger reagiert. Die gemessenen Fluoreszenzspektren sind in gutem Einklang mit dem Spektrum von FAD. Zusätzlich ist aus vorangegangenen Studien bekannt, dass im hier verwendeten Beleuchtungsbereich von 480–500 nm nur zwei Biomoleküle fluoreszieren: Flavin und Lipofuscin; die Intensität der Fluoreszenz des Lipofuscins ist jedoch deutlich geringer als die des Flavins. Spektroskopische und mechanistische Hinweise identifizierten somit Flavin als das Trägermolekül von Elekt-

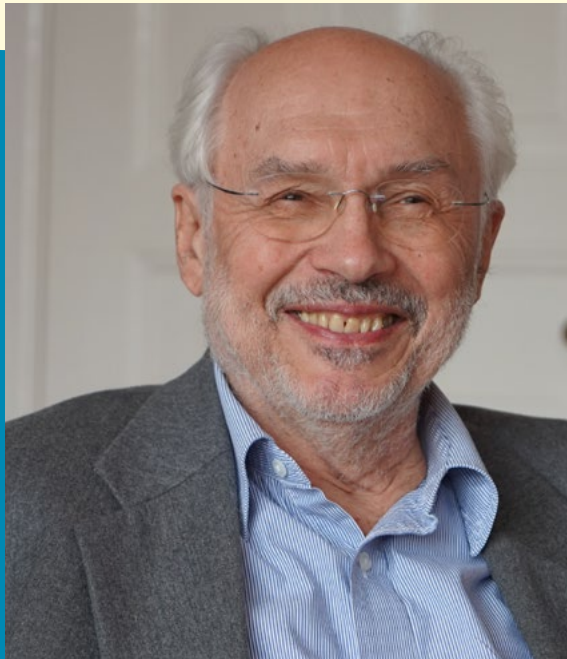
ronentransferreaktionen, welche durch den Radikalpaar-Mechanismus erklärt werden können. In HeLa-Zellen scheint das Flavin sehr spezifisch in der Mitochondrienmembran konzentriert zu sein; dies macht Sinn, da die wichtigste biologische Funktion von FAD die Beteiligung an der Atmungskette als Kofaktor vom Mitochondrien-Komplex II ist.

### Schlussfolgerung:

Laut den Forschern erklärt sich die hier gefundene weniger starke Empfindlichkeit des Membran-gebundenen Flavins im Vergleich zu Flavin im Cryptochrommolekül dadurch, dass Cryptochrom eine in puncto Magnetosensibilität hoch optimierte funktionelle molekulare Umgebung darstellt, die anderen Formen des Flavins jedoch nicht. Hier wurden gute Resultate bei 25 mT erzielt, in Studien mit Cryptochrom wurden zumeist Schwellenwerte unterhalb von 10 mT gefunden. Die Autoren deuten an, dass sie die hier gezeigte Methode in vielen weiteren Versuchen, mit anderen Zelltypen und unterschiedlichen Flavoproteinen anwenden wollen.

Abschließend befassen die Autoren sich mit der Frage nach der Wirkung schwacher elektromagnetischer Umweltfelder auf die menschliche Gesundheit. Flavine können anderen Studien zufolge *in vivo* phototoxisch sein. Dies könnte direkt auf die Bildung von freien Radikalen (über RP) zurückzuführen sein, was einen einfachen Mechanismus darstellen würde, durch den Magnetfelder das Ausmaß der Phototoxizität verändern könnten. Epidemiologische Studien deuten jedoch darauf hin, dass viel schwächere Felder als hier verwendet mit Leukämie im Kindesalter in Verbindung gebracht werden (~0,4 µT). Die Auswirkungen sehr schwacher Magnetfelder auf die RP-Reaktionen werden in der Regel unter dem Begriff Niederfeldeffekt diskutiert, der dem Zeeman-Effekt bei höheren Feldern entgegengesetzt ist. Wenn also die RP, die für die hier beobachteten Effekte verantwortlich sind, bei viel schwächeren Feldern eine umgekehrte Reaktion zeigen würden, wäre das Ergebnis eine geringere RP-Konzentration und damit eine geringere scheinbare Phototoxizität. Es ist jedoch auch möglich, dass die Phototoxizität durch einen anderen Mechanismus (z. B. die Reaktion von photoangeregtem Flavin mit Sauerstoff zur Erzeugung reaktiver Sauerstoffspezies, ROS) in Konkurrenz zur RP-Bildung entsteht. In diesem Fall würde eine Verringerung der RP-Konzentration zu einem Anstieg der angeregten Flavinkonzentration und damit potenziell zu einem Anstieg der ROS-Konzentration führen, was die in den epidemiologischen Studien beobachteten Schäden erklären würde.

Bislang gibt es keine experimentellen Hinweise auf RPM-basierte Effekte bei solch schwachen Magnetfeldern. Ein tieferes Verständnis der genauen Photochemie und RP-Dynamik wird neue Erkenntnisse liefern, die bei der Beantwortung dieser Frage helfen können. Experimente, die solche Informationen liefern sollen, sind bereits im Gange. (AT)



Prof. Dr. Franz Adlkofer



## **Nachruf auf Professor Dr. Franz Adlkofer**

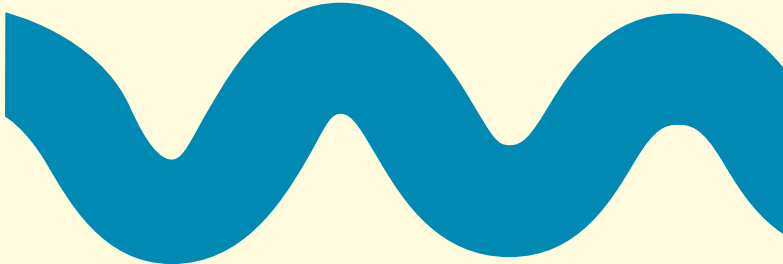
Wir trauern um Prof. Dr. Franz Adlkofer und sprechen seinen Angehörigen unser herzliches Beileid aus. Er verstarb im Juni 2022 im Alter von 86 Jahren. Die Welt hat einen engagierten und kämpferischen Forscher verloren! Franz Adlkofer war uns durch sein Wissen über die Forschung, über die Strukturen in Industrie und Politik, mit seinen Analysen und Fachartikeln immer ein zuverlässiger und persönlicher Ratgeber. Die Lücke, die er hinterlässt, ist nur schwer zu schließen.

Franz Adlkofer leitete das REFLEX-Projekt (2000–2004), ein von der EU gefördertes Forschungsvorhaben, an dem 12 Forschergruppen aus 7 europäischen Ländern beteiligt waren. In Laborversuchen wurde herausgefunden, dass die Mobilfunkstrahlung Zellen schädigen kann, bis hin zum Krebs. Dieses Ergebnis wurde nicht erwartet. Die Arbeit der Forschungsteams bestätigte die ersten Beobachtungen von Henry Lai und Vijay Singh aus dem Jahr 1994, die zeigten, dass sehr geringe Mengen von Hochfrequenzstrahlung die DNA in den Zellen von Tieren schädigen können. Diese Erkenntnisse wurden inzwischen vom National Toxicology Programm (USA) bestätigt.

Gegen die Ergebnisse des REFLEX-Projekts entstand ein regelrechter Kampf der Industrie. Franz Adlkofer und die beteiligten Wissenschaftler hielten dem Druck stand, auch als sie persönlich angegriffen wurden, und sie erlebten einen Sieg vor Gericht. Die letzten Jahre leitete Franz Adlkofer die Stiftung PANDORA, die sich für den Schutz von Mensch und Natur vor Mobilfunkstrahlung einsetzt.

Möge das Engagement von Prof. Adlkofer anderen Wissenschaftlern ein Ansporn sein, die Forschungen zur Reduktion von Umweltbelastungen weiter intensiv zu betreiben. Uns hat er gelehrt, dass man im Kampf gegen die Industrie-Lobby zäh sein muss, ihn mit sachlich fundierten Argumenten und mit einem Durchhaltevermögen, das er vorgelebt hat, gewinnen kann.

Dipl.-Biol. Isabel Wilke (Redaktion ElektrosmogReport)  
und der Vorstand von diagnose:funk



## Adressen für weitere seriöse Informationen

Diagnose:Funk – Umwelt- und Verbraucherorganisation  
zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung e. V.  
[www.diagnose-funk.org](http://www.diagnose-funk.org)  
Telefon: 069/36 70 42 03  
Telefonzeiten: montags und dienstags zwischen 8 und 10 Uhr  
E-Mail: [info@diagnose-funk.de](mailto:info@diagnose-funk.de)

Kompetenzinitiative zum Schutz von Mensch  
Umwelt und Demokratie e. V.  
[www.kompetenzinitiative.com](http://www.kompetenzinitiative.com)  
E-Mail: [sekretariat@kompetenzinitiative.net](mailto:sekretariat@kompetenzinitiative.net)  
Tel. 06897-766176

Microwavenews  
[www.microwavenews.com](http://www.microwavenews.com)  
E-Mail: [louis@microwavenews.com](mailto:louis@microwavenews.com)

PANDORA – Stiftung für unabhängige Forschung  
[www.stiftung-pandora.eu](http://www.stiftung-pandora.eu)  
Telefon: +49 3303 21 83 00  
Fax: +49 3303 40 46 82  
E-Mail: [info@stiftung-pandora.eu](mailto:info@stiftung-pandora.eu)

BRHP–Blog von Prof. Dariusz Leszczynski zu  
Wissenschaft und Politik  
[www.betweenrockandhardplace.wordpress.com](http://www.betweenrockandhardplace.wordpress.com)

## Datenbanken

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

