



Bundesamt
für Strahlenschutz

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: a systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro” by Cordelli et al. in Environment International (2024)

Kategorie [Hochfrequente Felder, Übersichtsarbeit]

Spotlight - Jul/2025 no.5 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Im Jahr 2019 initiierte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) ein internationales Projekt, das darauf abzielte, die Evidenz hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen der Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) und gesundheitsschädlichen Auswirkungen systematisch zu überprüfen [2]. Im Rahmen dieses Projekts wurden von einer Expertengruppe mehrere Endpunkte priorisiert, darunter die weibliche und männliche Fruchtbarkeit. Mögliche Auswirkungen der HF-EMF-Exposition auf die Fruchtbarkeit werden seit Jahren diskutiert und wurden umfassend in epidemiologischen Studien, experimentellen Tierstudien und In-vitro-Studien, z. B. an Spermien, untersucht. Es ist bekannt, dass Erwärmung die Spermienqualität beeinflusst, jedoch ist es nach wie vor unklar, ob HF-EMF die männliche Fruchtbarkeit über die Effekte der Erwärmung hinaus beeinflussen kann. Die Daten aus experimentellen Studien hierzu sind uneinheitlich. In dem systematischen Review von Cordelli et al. [1] wurden umfassende Daten zu den Auswirkungen von HF-EMF auf die männliche Fruchtbarkeit aus experimentellen Tier- und In-vitro-Studien gesammelt und ausgewertet. Auswirkungen auf Schwangerschaft und Geburtsergebnisse wurden in einem anderen systematischen Review derselben Autoren [3] untersucht, und in einem entsprechenden Spotlight [4] behandelt. In [5] bieten wir weitere Informationen zur WHO-Initiative und den daraus resultierenden systematischen Reviews an.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Cordelli et al.

Die Autoren sammelten, bewerteten und analysierten die gesamte verfügbare Evidenz zu den Auswirkungen einer HF-EMF Exposition auf die männliche Fruchtbarkeit auf Basis von experimentellen Tierstudien und Zellstudien (in vitro) an menschlichen Spermien. Ein Protokoll für die vorliegende Studie wurde im Voraus veröffentlicht [6], in dem die Suchstrategie, Einschlusskriterien, Bewertung der Studienqualität und die geplante Vorgehensweise für die Metaanalysen sowie die Evidenzbewertung detailliert beschrieben wurden. Die Autoren folgten den Richtlinien für systematische Reviews, die eine Bewertung der Studienqualität anhand von Verzerrungsrisiken (RoB) beinhalten, wie sie im *Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment* definiert sind [7]. Zusätzlich wurde geprüft, ob HF-EMF-induzierte Temperaturerhöhungen in den Studien berücksichtigt wurden, da dieser Aspekt besonders relevant ist bei der Exposition der Fortpflanzungsorgane gegenüber HF-EMF. Für die RoB-Bewertung der HF-EMF-Auswirkungen auf menschliches Spermium wurden einige Anpassungen für In-vitro-Studien vorgenommen, basierend auf vorherigen systematischen Reviews und Protokollen [8, 9, 10]. Basierend auf den RoB-Bewertungen wurde die Studienqualität als „geringe Bedenken“, „einige Bedenken“ oder „große Bedenken“ kategorisiert.

Für jede eingeschlossene Studie wurden die Studienmerkmale, einschließlich der Ergebnis- und Expositionsdaten, extrahiert. In Bezug auf Expositionsdaten wurden die angegebenen durchschnittlichen Ganzkörper-SAR-Werte (*whole body average SAR*, wbSAR) extrahiert. Falls diese nicht angegeben waren, wurde eine Schätzung des wbSAR basierend auf anderen dosimetrischen Informationen und biophysikalischen Annahmen gemäß den Empfehlungen von Durney (1986) [11] berechnet. Für die Metaanalysen wurden für jeden Endpunkt die durchschnittlichen wbSAR-Werte über alle Studien hinweg berechnet, sowie ein *Random-Effects*-Modell mit Zufallseffekten auf die Ergebnisdaten der Studien angewendet. Für das *Random-Effects*-Modell wurde der Varianzschätzer von DerSimonian und Laird für Variationen zwischen den Studien verwendet. Abhängig von den vorliegenden Daten wurden verschiedene Effektschätzer berechnet: z. B. *Odds Ratio* (OR) für binäre Daten, die Mittelwertdifferenz (MD) oder standardisierte Mittelwertdifferenz (SMD) für kontinuierliche Daten.

Für die abschließende Bewertung des Vertrauens in die Evidenz wurde eine modifizierte Version des GRADE-Ansatzes, die speziell für experimentelle Studien ausgelegt ist, verwendet [12]. Dem GRADE-Ansatz entsprechend wurde jedes Ergebnis in fünf Kategorien (RoB, Inkonsistenz, Indirektheit, Ungenauigkeit und Publikationsverzerrung) bewertet, was in hohem, moderatem, geringem oder sehr geringem Vertrauen in die Evidenz

resultierte. Nur Studien mit einer RoB-Bewertung mit „geringen Bedenken“ oder „einigen Bedenken“ wurden für die GRADE-Bewertung berücksichtigt.

Insgesamt wurden 1335 Arbeiten zu Tierstudien und 869 Studien zu humanen Spermien gefunden. Nach Entfernung der Duplikate, Titel- und Abstract-Screening sowie der Überprüfung auf Eignung wurden 117 Arbeiten zu Tierstudien und 10 Arbeiten zu menschlichen Spermien in den systematischen Review eingeschlossen.

Hinsichtlich der Studienqualität wurden nur sehr wenige Studien mit „geringe Bedenken“ bewertet, die Mehrheit wurde mit „einige Bedenken“ oder „hohe Bedenken“ eingestuft. Hauptgründe für Bedenken bei beiden Studienarten waren das Fehlen der Verblindung während der Experimente, eine unzureichende Charakterisierung der Exposition und Dosimetrie sowie geringes Vertrauen in die Ergebnisbewertung, hauptsächlich aufgrund fehlender Verblindung während der Analyse der Endpunkte.

Keine der eingeschlossenen Studien bot eine angemessene Temperaturkontrolle (d. h. Proben, die einer direkten Erwärmung bei einer Temperatur vergleichbar der durch HF-EMF-induzierten Temperaturen ausgesetzt sind). Dies hätte die Möglichkeit eröffnet, zwischen möglichen, „direkten“ HF-EMF-Effekten und solchen, die durch Gewebeerwärmung vermittelt werden, zu unterscheiden.

Für die in den Studien untersuchten Tiere (Mäuse und Ratten) definierten die Autoren vier Hauptkategorien für die untersuchten Endpunkte (Verringerung der Fruchtbarkeit, Auswirkungen auf die Spermienqualität, Reproduktionsorgan-Toxizität und hormonelle Effekte), jede mit mehreren Endpunkten. Für In-vitro-Studien war die Spermienqualität die einzige Hauptkategorie. Für jeden Endpunkt wurden Metaanalysen für Studien, die mit „geringe Bedenken“ und „einige Bedenken“ eingestuft wurden, getrennt von jenen Studien mit „großen Bedenken“ durchgeführt. Nur die Ergebnisse der Studien, die mit „geringen“ oder „einigen Bedenken“ bewertet wurden, sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Ergebnisse ihres systematischen Reviews auf einen schädlichen Effekt der HF-EMF-Exposition auf die Schwängerungsrate und die Spermienzahl hindeuten, jedoch keinen Effekt für die Größe des Wurfs bei den Versuchstieren zeigten. Der Rückgang der Schwängerungsrate kann auf thermische Effekte zurückgeführt werden. Für alle anderen Endpunkte konnte keine allgemeine Expositions-Wirkungs-Beziehung oder minimale wirksame Expositionsstufe bestimmt werden, sodass keine Empfehlungen für menschliche Expositions-niveaus aus dieser systematischen Übersicht abgeleitet werden konnten.

Die Autoren stellen fest, dass die durchschnittlichen Ganzkörper-Expositions-niveaus in den einbezogenen Studien im Vergleich zu den für den Menschen relevanten Niveaus hoch waren: 75–80 % der Studien testeten Expositions-niveaus über 0,4 W/kg (ICNIRP-Grundbeschränkung für beruflich Beschäftigte) und 46–53 % testeten Expositions-niveaus über 4 W/kg (ein Expositions-niveau, das bei längerer Expositions-dauer zu einer Erhöhung der Körperkerntemperatur um 1 °C beim Menschen führen kann [13]). Daher ist unbekannt, inwieweit die Schlussfolgerungen dieses systematischen Reviews auf für den Menschen relevante Expositions-niveaus angewendet werden können.

Für zukünftige Forschungen empfehlen die Autoren, sich stärker auf die Verblindung während des Experiments und der Endpunktbewertung sowie auf die Expositionscharakterisierung und Dosimetrie zu konzentrieren. Die Autoren raten von weiteren In-vitro-Studien an menschlichen Spermienproben ab, aufgrund biologischer Einschränkungen im Hinblick auf den Reifungsprozess menschlicher Spermien, der in diesen Experimenten nicht abgebildet werden kann. Stattdessen schlagen sie vor, die Samenqualität beim Menschen durch Biomonitoring-Untersuchungen an HF-EMF-exponierten Populationen zu analysieren.

3 Kommentare des BfS

Dieser systematische Review ist aus Sicht des Strahlenschutzes bedeutsam und bietet eine ausführliche Zusammenstellung der verfügbaren Daten. Sie ist sowohl für die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch für die allgemeine Öffentlichkeit von Interesse.

Die Studie wurde gemäß den Qualitätsstandards für systematische Reviews durchgeführt [7]. Die Einschlusskriterien waren relativ breit gefasst und umfassen eine Vielzahl unterschiedlicher Expositionsbedingungen, einschließlich elektromagnetischer Pulse, sowie viele verschiedene Endpunkte im Zusammenhang mit der männlichen Fruchtbarkeit. Dieser Ansatz ermöglichte eine hinreichend große Datenbasis, um alle relevanten Endpunkte zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieses systematischen Reviews unterliegen zahlreichen Einschränkungen. Es ist zu beachten, dass die durchschnittlichen Expositionsniveaus in den zugrunde liegenden Studien weit über den empfohlenen Grenzwerten für Menschen liegen (durchschnittliche Ganzkörper-SAR Grenzwert = 0,08 W/kg) [13]. Aufgrund unzureichender Temperaturkontrollen in den einbezogenen Studien ist es nicht möglich, zwischen nicht-thermischen HF-EMF-Effekten (falls sie existieren) und thermischen HF-EMF-Effekten zu unterscheiden, die bekanntermaßen schädlich für Spermien und deren Reifung sind [14]. Aufgrund der allgemein hohen Expositionen kann darüber hinaus nicht bestimmt werden, ab welchem Schwellenwert HF-EMF-Exposition die männliche Fertilität in experimentellen Tierstudien beeinflussen könnte. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu betonen, dass aufgrund von Einschränkungen in der zugrunde liegenden Datenbasis alle Daten entweder auf angegebene oder grob angenäherte wbSAR-Werte bezogen sind. Bei einem gegebenen wbSAR hängt das Ausmaß des Anstiegs der Körperkerntemperatur nicht nur von der Expositionsdauer ab, sondern auch von Faktoren wie Größe und Masse der Spezies, deren thermoregulatorischer Fähigkeit sowie davon, ob das Tier fixiert (z. B. in Röhren) oder frei beweglich ist und ob es anästhesiert wurde oder nicht. Sollten die beobachteten Effekte tatsächlich durch einen Anstieg der Körperkerntemperatur vermittelt werden, könnten diese Faktoren auch zu der beobachteten Heterogenität in den Studienergebnissen beitragen.

Eine weitere Limitation betrifft die lokale Temperatur im Hoden, die für viele Parameter der männlichen Fertilität (z. B. Spermienzahl) weitaus relevanter ist als die Körperkerntemperatur. Dies wird auch von den Autoren angeführt: „es gibt keine klare Beziehung zwischen der Hodentemperatur und dem durchschnittlichen wbSAR-Wert“. Auch wenn die beobachteten Effekte eine direkte Wirkung der HF-EMF im Hoden (statt thermisch vermittelt) sind, wären Daten zu einem Expositionsmaß erforderlich, welches nur lokal im interessierenden Organ gemittelt ist, um mögliche Expositions-Wirkungs-Beziehungen herzustellen.

In Studien, die mehrere exponierte Gruppen, aber nur eine Kontrollgruppe verwendeten, entschieden sich die Autoren, Expositionen und Effekte zu mitteln, um einen *shared-sham bias* zu vermeiden. Dies könnte zu einer Verwässerung von Effekten geführt haben, die sich nur bei hohen Expositionsniveaus zeigen. Eine alternative Methode, um einen *shared-sham bias* zu vermeiden, wäre die Verwendung von Datensätzen gewesen, die den größten Expositionscontrast in Studien mit geteilten Kontrollen aufweisen. Dies hätte die Wahrscheinlichkeit erhöht, einen möglichen expositionsbedingten Effekt in der Metaanalyse zu erkennen.

Insgesamt untersuchten die Autoren fünfzehn verschiedene Endpunkte, doch für die meisten war das Vertrauen in die Evidenz „sehr gering“, sodass aus Sicht des Strahlenschutzes für die Mehrheit dieser Ergebnisse keine verlässlichen Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Für drei Ergebnisse jedoch war das Vertrauen in die Evidenz höher. Das robusteste Ergebnis ist eine hohe Sicherheit der Evidenz dafür, dass HF-EMF-Exposition die Schwängerungsrate verringert. Die Autoren betonen jedoch, dass in der Subgruppenanalyse nur Studien mit Expositionen von mindestens 5 W/kg ein statistisch signifikant erhöhtes OR aufwiesen. Die Studien mit geringeren Expositionen zeigten dies nicht, was darauf hindeutet, dass dieser Effekt nur bei sehr hohen Expositionen auftritt, die zu Temperaturerhöhungen in den betroffenen Geweben führen. Allerdings ist es überraschend, dass die Ergebnisse der Expositions-Wirkungs-Analyse zur Spermienzahl, einem entscheidenden Faktor für die männliche Fertilität, keinen statistisch signifikanten Anstieg schädlicher Effekte bei steigenden SAR-Werten zeigen, was auch von den Autoren angemerkt wurde. Wenn diese Diskrepanz nicht auf Limitationen der Studien zurückzuführen wäre, würde dies Fragen zum zugrunde liegenden Mechanismus der verringerten Schwängerungsrate aufwerfen. Für den Endpunkt Spermienzahl selbst führte die Metaanalyse zu einer statistisch signifikanten Abnahme nach hoher HF-EMF-Exposition, aber die Sicherheit der Evidenz ist gering. Zwar ist die Datenbasis mit mehr als 80 Studien sehr groß, die individuellen Studienergebnisse jedoch sehr heterogen. Die Gründe für die hohe Heterogenität konnten in weiteren Subgruppenanalysen von den Autoren nicht aufgeklärt werden. Es gibt ein moderates Vertrauen in die Evidenz dafür, dass HF-EMF-Exposition keinen Effekt auf die Größe des Wurfs hatte. Ungeachtet der sehr hohen Expositionen in den einbezogenen Studien deuten die einzelnen Ergebnisse

konsistent auf keinen Effekt hin. Die Expositions-Wirkungs-Analyse bestätigte den nicht vorhandenen Zusammenhang zwischen HF-EMF-Exposition und verringerter Wurfgröße. Die Ergebnisse für die drei Endpunkte Wurfgröße, Spermienzahl und Schwängerungsrate sind somit inkonsistent, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass die jeweils zugrunde liegende Studienbasis nicht identisch ist. Insgesamt ist es wahrscheinlich, dass es bei sehr hohen Expositionen in Tierversuchen einen Effekt von HF-EMF auf die Schwangerschaftsrate und die Spermienzahl geben könnte, der höchstwahrscheinlich auf thermische Effekte zurückzuführen ist, aber dennoch in zukünftigen Tierstudien aufgeklärt werden sollte. Für Menschen liefern die Ergebnisse dieses systematischen Reviews keine Hinweise für mögliche Effekte innerhalb der empfohlenen Grenzwerte für die durchschnittliche Ganzkörper-SAR (wbSAR).

Insgesamt liefern die Autoren eine umfassende, gründlich durchgeführte und transparente Arbeit, um die Forschungsfrage eingehend zu untersuchen. Aus Sicht des Strahlenschutzes bieten die Einschränkungen hinsichtlich der Qualität der einbezogenen Studien und die daraus resultierende insgesamt sehr geringe Sicherheit der Evidenz für die meisten Endpunkte keine verlässlichen Belege für oder gegen einen konsistenten HF-EMF-Effekt auf die männliche Fruchtbarkeit in experimentellen Tierstudien. Die PECO-Elemente Schwängerungsrate und Spermienzahl verdienen jedoch weitere Untersuchungen. Um die Unsicherheiten der vorherigen Studien zu verringern, wäre es wünschenswert, dass zukünftige experimentelle Tierstudien Expositions-Wirkungs-Analysen zur Eingrenzung möglicher Schwellenwerte für das Auftreten eines Effekts (einschließlich für den Menschen relevanter Expositionen) beinhalten sowie eine geeignete Dosimetrie, Temperaturkontrollen und verblindete experimentelle Verfahren und Endpunktanalysen verwenden.

| Endpunkt | Anzahl Studien | Mittleres Expositionslevel (wbSAR) | Effektschätzer [95 % Konfidenzintervall] | Interpretation des Effektschätzers | Vertrauen in die Evidenz |
|--|----------------|------------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------|
| Verringerung der Fruchtbarkeit (Tierstudien) | | | | | |
| Nicht-trächtige vs. verpaarte Weibchen ^{*,†} | 9 | ~24 W/kg | OR 1.91 [1.30 — 2.81]* | ↓ Schwängerungsrate | Hoch* |
| Größe des Wurfs [†] | 16 | ~24 W/kg | SMD 0.04 [-0.15 — 0.23] | Kein Effekt | Moderat |
| Rate unfruchtbarer Männchen | 4 | ~0.4 W/kg | OR 1.38 [0.32 — 5.94] | Kein Effekt | Sehr gering |
| Befruchtungsrates in vitro | 1 | Keine Bewertung, nur 1 Studie | | | |
| Auswirkungen auf die Spermienqualität (Tierstudien) | | | | | |
| Spermienzahl | 80 | ~12 W/kg | SMD 0.74 [0.51 — 0.98] | ↓ Spermienzahl | Gering |
| Spermienmorphologie | 65 | ~14 W/kg | MD -0.94 [-1.28 — -0.59] | ↑ Zahl anormaler Spermien | Sehr gering |
| Spermiovitalität | 32 | ~1.5 W/kg | MD -10.83 [-15.2 — -6.47] | ↓ Spermiovitalität | Sehr gering |
| DNA-Veränderungen in Spermien | 6 | ~1.6 W/kg | SMD -1.92 [-2.78 — -1.05] | ↑ Marker für DNA-Veränderungen | Sehr gering |
| Reproduktionsorgan-Toxizität (Tierstudien) | | | | | |
| Gewicht Hoden und Nebenhoden | 55 | ~4 W/kg | SMD 0.29 [0.10 — 0.47] | ↓ Gewicht | Sehr gering |
| Hoden Histomorphometrie | 24 | ~2.5 W/kg | SMD 0.9 [0.32 — 1.49] | ↓ Tubulusdurchmesser | Sehr gering |
| Histologie Hoden und Nebenhoden | 17 | ~3 W/kg | MD 0.69 [0.45 — 0.92] | ↑ Gewebeveränderung | Sehr gering |
| Zelltod im Hodengewebe | 23 | ~7 W/kg | SMD -1.18 [-1.82 — -0.54] | ↑ Tote Zellen | Sehr gering |
| Spermienproduktion im Hoden | 36 | ~6 W/kg | SMD 0.87 [0.51 — 1.22] | ↓ Spermienproduktion | Sehr gering |
| Hormonelle Effekte (Tierstudien) | | | | | |
| Testosteronlevel | 29 | ~1 W/kg | SMD 0.87 [0.43 — 1.3] | ↓ Testosteronlevel | Sehr gering |
| Spermienqualität (humane In-vitro-Studien) | | | | | |
| Morphologie | 1 | Keine Bewertung, nur 1 Studie | | | |
| Vitalität | 23 | SAR nicht angegeben | MD -1.37 [-2.46 — -0.28] | ↓ Vitalität | Sehr gering |
| DNA-Veränderungen | 13 | SAR nicht angegeben | SMD -0.17 [-0.48 — 0.13] | Kein Effekt | Sehr gering |

Abkürzungen: OR = Odds Ratio, MD = Mittelwertdifferenz, SMD = Standardisierte Mittelwertdifferenz.

* In der ursprünglichen Studie ergab die Analyse ein OR = 2,42 [95 % KI (1,68 — 3,50)] bei einer moderaten Sicherheit der Evidenz [1]. In einem publizierten Korrigendum berichtigten die Autoren einige Fehler in der Analyse [15]. In der ursprünglichen Analyse trug eine einzelne Studie etwa 50 % zu den Ergebnissen der Metaanalyse bei (Saunders et al., 1983 [16]). In dieser Studie wurden 24 exponierte männliche Mäuse mit einer Gruppe von 18 schein-exponierten Mäusen verglichen und zu verschiedenen Zeiten nach der Exposition über insgesamt 10 aufeinanderfolgenden Paarungen mit Gruppen nicht-exponierter Weibchen verpaart. Die Experimente waren somit nicht unabhängig und mussten für die korrigierte Analyse aggregiert werden. Diese Korrektur führte zu einem OR = 1,91 [95 % KI (1,30 — 2,81)] und einem Anstieg der Evidenzsicherheit von „moderat“ auf „hoch“.

† In der ursprünglichen Studie [1] wurden in der Analyse der Studien mit hoher Besorgnis drei Ergebnisse aus einer Studie berücksichtigt, die nicht unabhängig waren (Goud et al., 1982, [17]). Für das Korrigendum [15] wurden die Ergebnisse zusammengefasst und die Analyse neu berechnet. Dies hatte keinen Einfluss auf das Vertrauen in die Evidenz.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Metaanalysen und der GRADE-Bewertung für jede Endpunkt-Kategorie. Die Tabelle enthält die Ergebnisse des Korrigendums, publiziert im April 2025 [15].

Referenzen

- [1] Cordelli, E, Ardoino, L, Benassi, B, Consales, C, Eleuteri, P, Marino, C, Sciortino, M, Villani, P, Brinkworth, MH, Chen, G, McNamee, JP, Wood, AW, Belackova, L, Verbeek, J, Pacchierotti, F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Environment International*. 2024; 185:108509.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108509>.
- [2] Verbeek, J, Oftedal, G, Feychting, M, van Rongen, E, Scarfi, MR, Mann, S, Wong, R, van Deventer, E. Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environment International*. 2021; 146:106300.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106300>.
- [3] Cordelli, E, Ardoino, L, Benassi, B, Consales, C, Eleuteri, P, Marino, C, Sciortino, M, Villani, P, Brinkworth, MH, Chen, G, McNamee, JP, Wood, AW, Belackova, L, Verbeek, J, Pacchierotti, F. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. *Environment International*. 2023; 180:108178.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108178>.
- [4] Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF), Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Spotlight on “Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals” by Cordelli et al. in *Environment International* (2023). *Spotlight on EMF Research*; Spotlight - Jun/2024 no.1.
URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2024061244261>.
- [5] Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF), Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Spotlight on “WHO assessment of health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: systematic reviews”, eine Sonderreihe in *Environment International*. *Spotlight on EMF Research*; Spotlight - Apr/2024 no.2.
URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2024042443254>.
- [6] Pacchierotti, F, Ardoino, L, Benassi, B, Consales, C, Cordelli, E, Eleuteri, P, Marino, C, Sciortino, M, Brinkworth, MH, Chen, G, McNamee, JP, Wood, AW, Hooijmans, CR, de Vries, RBM. Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility and pregnancy and birth outcomes: Protocols for a systematic review of experimental studies in non-human mammals and in human sperm exposed in vitro. *Environment International*. 2021; 157:106806.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106806>.
- [7] National Toxicology Program (NTP). *Handbook for conducting a literature-based health assessment using OHAT approach for systematic review and evidence integration*. 2015:98.
URL: https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/ohat/pubs/handbookjan2015%5C_508.pdf.
- [8] Bodewein, L, Schmiedchen, K, Dechent, D, Stunder, D, Graefrath, D, Winter, L, Kraus, T, Driessen, S. Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz–1MHz). *Environmental Research*. 2019; 171:247–259.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.015>.
- [9] Golbach, LA, Portelli, LA, Savelkoul, HF, Terwel, SR, Kuster, N, de Vries, RB, Verburg-van Kemenade, BM. Calcium homeostasis and low-frequency magnetic and electric field exposure: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Environment International*. 2016; 92–93:695–706.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.014>.
- [10] Romeo, S, Zeni, O, Sannino, A, Lagorio, S, Biffoni, M, Scarfi, MR. Genotoxicity of radiofrequency electromagnetic fields: Protocol for a systematic review of in vitro studies. *Environment International*. 2021; 148:106386.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106386>.

- [11] Durney, CH, Massoudi, H, Iskander, MF. *Radiofrequency radiation dosimetry handbook (fourth edition) : Final report for period 1 July 1984 - 31 December 1985, prepared for USAF School of Aerospace Medicine*. Salt Lake City: Electrical Engineering Department, The University of Utah, 1986.
URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA180678.pdf>.
- [12] Rooney, AA, Boyles, AL, Wolfe, MS, Bucher, JR, Thayer, KA. Systematic review and evidence integration for literature-based environmental health science assessments. *Environmental Health Perspectives*. 2014; 122(7):711-718.
DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1307972>.
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*. 2020; 118(5):483-524.
DOI: <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- [14] Paul, C, Murray, AA, Spears, N, Saunders, PT. A single, mild, transient scrotal heat stress causes DNA damage, subfertility and impairs formation of blastocysts in mice. *Reproduction*. 2008; 136(1):73-84.
DOI: <https://doi.org/10.1530/REP-08-0036>.
- [15] Cordelli, E, Ardoino, L, Benassi, B, Consales, C, Eleuteri, P, Marino, C, Sciortino, M, Villani, P, Brinkworth, MH, Chen, G, McNamee, JP, Wood, AW, Belackova, L, Verbeek, J, Pacchierotti, F. Corrigendum to "Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro" [Environ. Int. 185 (2024) 108509]. *Environment International*. 2025; 199:109449.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109449>.
- [16] Saunders, RD, Darby, SC, Kowalczyk, CI. Dominant lethal studies in male mice after exposure to 2.45 GHz microwave radiation. *Mutation Research*. 1983; 117(3-4):345-56.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(83\)90134-9](https://doi.org/10.1016/0165-1218(83)90134-9).
- [17] Goud, SN, Rani, MV, Reddy, PP, Reddi, OS, Rao, MS, Saxena, VK. Genetic effects of microwave radiation in mice. *Mutation Research*. 1982; 103(1):39-42.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-7992\(82\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0165-7992(82)90084-7).

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

www.bfs.de

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: spotlight@bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2025072953677

Spotlight - Jul/2025 no.5 (Deu)