

Dies ist die deutsche Übersetzung der englischsprachigen Studie „Biologische Auswirkungen von EMF auf Insekten“. Der Originaltitel lautet: Thill A, Cammaerts M-C, Balmori A. Biological Effects of Electromagnetic Fields on Insects: a Systematic Review and Metaanalysis. Erschienen im November 2023 in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift „Reviews on Environmental Health“ im Verlag De Gruyter, online: <https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0072>

Alain Thill*, Marie-Claire Cammaerts, Alfonso Balmori

Biologische Wirkungen von elektromagnetischen Feldern auf Insekten: eine systematische Übersicht und Metaanalyse

Zusammenfassung: Weltweit geht die Zahl der Insekten in alarmierendem Maße zurück. Neben anderen Ursachen spielen der Einsatz von Pestiziden und moderne landwirtschaftliche Praktiken dabei eine große Rolle. Die kumulativen Auswirkungen multipler niedrig dosierter Toxine und die Verteilung von Giftstoffen in der Natur werden erst seit kurzem methodisch untersucht. Bestehende Forschungen weisen auf einen weiteren Faktor anthropogenen Ursprungs hin, der subtilere schädliche Auswirkungen haben könnte: die immer häufigere Nutzung elektromagnetischer Felder (EMF) durch vom Menschen geschaffene Technologien. Diese systematische Übersicht fasst die Ergebnisse von Studien zusammen, die die Toxizität elektromagnetischer Felder auf Insekten untersucht haben. Das Hauptziel dieser Übersichtsarbeit ist es, die Beweise für schädliche Auswirkungen der zunehmenden technologischen Infrastruktur auf Insekten abzuwägen, mit besonderem Augenmerk auf Stromleitungen und das Mobilfunknetz. Die nächste Generation von Mobilfunktechnologien, 5G, wird eingeführt, ohne dass sie auf mögliche toxische Auswirkungen getestet wurde. Mit dem Streben der Menschheit nach einer allgegenwärtigen Technologie könnten selbst geringe Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Organismen schließlich ein Sättigungsniveau erreichen, das nicht mehr ignoriert werden kann. Es wird ein Überblick über die berichteten Wirkungen und biologischen Mechanismen der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern gegeben, der auch neue Erkenntnisse der Zellbiologie berücksichtigt. Nicht-thermische biologische Wirkungen von EMF auf Insekten sind im Labor eindeutig nachgewiesen, aber nur teilweise im Freiland, sodass die weiteren ökologischen Auswirkungen noch unbekannt sind. Es besteht ein Bedarf an mehr Feldstudien, aber die Extrapolation aus dem Labor, wie es in der Ökotoxikologie üblich ist, lässt bereits auf eine Erhöhung des Bedrohungsniveaus durch Auswirkungen von EMF auf Insekten schließen.

Stichworte: Elektromagnetische Strahlung; Hochfrequenz; Niederfrequenz; Mobiltelefon; Drosophila; Honigbiene.

Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Insekten: eine systematische Übersicht und Metaanalyse

Kurztitel: Biologische Auswirkungen von EMF auf Insekten

Alain Thill¹, Marie-Claire Cammaerts², Alfonso Balmori³

¹ Unabhängiger Forscher, Luxemburg

² Unabhängige Forscherin im Ruhestand, Universität Brüssel

³ Unabhängiger Forscher, Valladolid, Spanien.

ORCID ID: 0000-0002-4118-0912

***Korrespondierender Autor:**

Alain Thill, Msc Env Sciences (alain.thill@protonmail.com)

Einführung

Insekten sind ein wesentlicher Bestandteil aller Ökosysteme. Es wird geschätzt, dass über 80 Prozent der Blütenpflanzen Bestäuber benötigen [1]. Ohne bestäubende Insekten würde etwa ein Drittel aller Wildpflanzenarten überhaupt keine Samen produzieren, und bei der Hälfte würde die Fruchtbarkeit um 80% abnehmen [2]. Bestäuber tragen zur Produktivität der meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bei, und ihr Fehlen könnte nur durch kostspielige Alternativen kompensiert werden, wie Wanderimkereien, kommerzielle Hummelkolonien und manuelle Bestäubung [3]. Darüber hinaus tragen Insekten zur Verbreitung von Saatgut, zum Nährstoffkreislauf und zur Zersetzung von Detritus bei und bilden eine wichtige Stufe in der Nahrungskette [4]. Viele Amphibien-, Reptilien- und Vogelarten ernähren sich von Insekten, zumindest während kritischer Wachstumsphasen [5, 6]. Der Verlust von Bestäubern könnte die Zahl der menschlichen Todesfälle weltweit jährlich um etwa 1,4 Millionen erhöhen, was einem Anstieg von 2,7 % entspricht [7, 8].

Der Rückgang der Insekten begann vor mehreren Jahrzehnten und wird durch eine Vielzahl von Faktoren mit kumulativen Auswirkungen verursacht [9–11]. Die Hauptursachen sind der Einsatz von Pestiziden und die Zerstörung, Beeinträchtigung oder Fragmentierung natürlicher Lebensräume sowie in geringerem Maße auch invasive Arten, der Klimawandel und die Übernutzung [12]. Auch Schadstoffe, deren Vorkommen in der Natur in den letzten Jahrzehnten drastisch zugenommen hat, sind wahrscheinlich mitbeteiligt: Endokrine Disruptoren, Schwermetalle und elektromagnetische Felder [13–15]. Agrochemikalien haben synergistische toxische Wirkungen: zwei Pestizide, die jeweils in einer Dosis verabreicht werden, die 10% der Versuchstiere tötet, können bis zu 90% töten, wenn sie gleichzeitig verabreicht werden [16].

Diese systematische Übersichtsarbeit nach PRISMA-Richtlinien [17] befasst sich mit den Auswirkungen von nieder- und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf Insekten. Elektromagnetische Felder (EMF) sind Felder, die durch bewegte elektrische Ladungen erzeugt werden, welche Kräfte auf jedes geladene Objekt in ihrer Nähe ausüben. Sie bestehen aus zwei unterschiedlichen, aber untrennbaren Feldkomponenten (elektrisch und magnetisch), die senkrecht zueinander stehen, wie in den Maxwell'schen Gleichungen beschrieben [18]. Natürliche EM-Strahlung (EMS), z. B. Sonnenlicht und durch Blitzentladungen verursachte Resonanzen in der Atmosphäre (Schumann-Resonanzen), unterscheiden sich von anthropogenen EMF. Anthropogene EMF sind kohärent, polarisiert und stärker als natürliche EMF [19]. Man unterscheidet

zwischen extrem niederfrequenten elektromagnetischen Feldern (NF-EMF), hauptsächlich von Hochspannungsleitungen und Netzstrom mit 50- oder 60-Hz-Frequenz ausgehend, und hochfrequenten EMF (HF-EMF), z.B. bei WLAN und Mobiltelefonie, aber auch Radar, meist im Bereich von einigen GHz [20]. Technisch gesehen fallen die heute üblichen menschengemachten HF-EMF in die Kategorie der Ultra- oder Superhochfrequenzen, d.h. der Mikrowellen (300 MHz–300 GHz), werden aber hier als HF bezeichnet [20]. HF-EMF breiten sich wellenförmig als Strahlung aus (d. h. Fernfeldverhalten), während NF-EMF von Hochspannungsleitungen besser als an diese Leitungen gebunden beschrieben werden (d. h. Nahfeldverhalten). Technische HF-EMF sind in der Regel gepulst oder pulsmoduliert, d. h. die Trägerfrequenz (eine Sinuswelle) wird viele Male pro Sekunde ausgesendet, unterbrochen und wieder ausgesendet. Typische Werte sind 10 Hz (WLAN), 100 Hz (DECT), 217 Hz (GSM) bis hin zu 1000 Hz und mehr (4G und 5G). Der weit verbreitete Einsatz neuerer Technologien, die HF-EMF nutzen, d. h. WLAN und Mobiltelefone, begann etwa 1990. Im Allgemeinen wird zwischen thermischen und nicht-thermischen Wirkungen elektromagnetischer Felder unterschieden. Die thermische Wirkung beruht auf der direkten Erwärmung von Gewebe (wie in einem Mikrowellenherd) und ist biologisch relevant bei einer Erhöhung von mehr als 1° C. Unterhalb der Intensitäten, bei denen die Erwärmung des Gewebes erheblich ist, wurden mehrere nicht-thermische Effekte beschrieben, zum Beispiel parametrische Resonanz und Mikrowellenhören beim Menschen (Frey-Effekt) [21, 22]). Jüngste Erkenntnisse aus der Zellbiologie deuten darauf hin, dass es mehrere Mechanismen oder Wege gibt, um die experimentell beobachteten biologischen Wirkungen von EMF zu erklären, wie im Folgenden erläutert wird.

Ephaptische Kopplung und Wahrnehmung von EMF durch Ionenkanäle zur Synchronisierung neuronaler Aktivität

Tiere haben stabile Rhythmen in ihren Gehirnen, die z. B. mit dem Elektroenzephalogramm (EEG) oder mit Elektroden gemessen werden können. Bei Honigbienen und Heuschrecken wurde eine Haupt-Pulsfrequenz von 18 Hz oder 20 Hz beobachtet und 20–30 Hz bei *Drosophila* Fruchtfliegen [23–25]. Parametrische Resonanz beschreibt die Veränderung des menschlichen oder tierischen EEGs, die bei Exposition mit gepulsten EMF beobachtet wird, deren Pulsfrequenz sich mit den Gehirnfrequenzen überschneidet [26, 27]. Mit Gehirnfrequenzen gepulste EMF verursachen wesentlich stärkere Auswirkungen als kontinuierliche, nicht gepulste EMF. Dies ist wahrscheinlich ein Nebenprodukt der Funktionsweise von spannungsgesteuerten Ionenkanälen („voltage-gated ion channels“, VGICs), die für die Weiterleitung von Nervenimpulsen verantwortlich sind, und könnte sich daher auf alle Tiere und Pflanzen auswirken [22, 28]. VGICs, z.B. Na⁺-, K⁺-, Ca²⁺-Kanäle sowie der NMDA-Rezeptor, reagieren empfindlich auf nicht-thermische (d.h. sehr geringe) endogene EMF-Stärken. Die Wahrnehmung von umgebenden EMF, welche durch die neuronale Aktivität entstehen, kann zu Kopplung von Nervenfasern als Folge lokaler elektrischer Felder führen [29–31]. Diese sogenannte „ephaptische Kopplung“ beeinflusst die Synchronisation und das Timing des Feuerns von Aktionspotenzialen in Neuronen und scheint eine aktive Rolle im Herzen, im Hippocampus, im Kleinhirn und in den Geruchs- und Antennennerven zu spielen [30, 32–35]. Es wurde gezeigt, dass VGICs auf NF-EMF reagieren [36–39]. Die Akti-

vierung von spannungsabhängigen Natrium- oder Kaliumkanälen oder NMDA-Rezeptoren führt indirekt zu einer verstärkten Aktivierung von synaptischen spannungsgesteuerten Kalziumkanälen (VGCC) und zur Freisetzung von Kalzium [40]. Kalzium ist ein wichtiger sekundärer Botenstoff in allen Organismen, und ein erhöhter Kalziumspiegel hat eine stimulierende Wirkung, z. B. auf die Atmungskette und die Muskeln [41, 42]. Eine Überaktivierung der kalziumabhängigen Neurotransmission führt zur Produktion reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) wie Peroxynitrit, d. h. zu oxidativem Stress. Chronischer oxidativer Stress hat eine toxische Wirkung auf Organismen, z. B. durch Blockierung der Atmungskette, Schädigung der Mitochondrien, Fehl-Aktivierung des Immunsystems und eine erhöhte Mutationsrate [43, 44].

Es ist erwiesen, dass geomagnetische Stürme, die durch Sonneneruptionen verursacht werden, bei Tieren Stress verursachen, eine Tatsache, die bei Fischen und Daphnien, Zugvögeln und Honigbienen dokumentiert ist [45–47]. Bei Sonneneruptionen, die auf die Erde treffen, ändert sich der Abstand der Ionosphäre zum Boden, was wiederum die Schumann-Resonanzen verändert [48]. Es könnte sein, dass die Wahrnehmung der stabilen Frequenzen der Schumann-Resonanzen (7,83 Hz, 14 Hz, 20 Hz) ein wichtiger Schritt in der Evolutionsgeschichte war, der stabile Biorhythmen ermöglichte [49, 50]. Das Rattenherz reagiert auf sehr schwache Magnetfelder im Bereich der ersten Schumann-Resonanz (7,6–8 Hz) [51]. Dies wird möglicherweise durch VGCC und Ca²⁺-Pumpen des sarko-/endoplasmatischen Retikulums (SERCA) vermittelt, denn spezifische Blocker heben die Wirkung auf [52]. Dies steht im Einklang mit theoretischen Berechnungen von Panagopoulos und Balmori und könnte die Art und Weise sein, wie Tiere bevorstehende Erdbeben wahrnehmen, denn Erdbeben gehen Störungen des geomagnetischen Feldes und der Ionosphäre voraus [53, 54]. Die Hypothese, dass VGCCs der Hauptkanal für die biologischen Wirkungen von EMF sind, basiert auf Beobachtungen, dass EMF eine Kalziumfreisetzung verursachen (die zu oxidativem Stress führt), dass Kalziumkanalblocker vor nachteiligen Wirkungen schützen, sowie auf theoretischen Überlegungen [55, 56].

Magnetsinn

Ein magnetischer Sinn ist bei den meisten Insektenordnungen beschrieben worden, z.B. bei Schmetterlingen, Käfern, Fliegen, Ameisen und Bienen, Termiten und Kakerlaken [57–61]. Die Details sind noch nicht abschließend geklärt, und es gibt mindestens zwei Mechanismen zur Wahrnehmung des geomagnetischen Feldes: Cryptochrom und Magnetit, die beide in Wirbeltieren und Insekten vorkommen [62, 63]. Außerdem haben einige Fische und Insekten (z. B. der Zitteraal und die Hornisse) spezialisierte Organe oder Zellen zur Wahrnehmung elektrischer Felder [64].

Cryptochrom

Cryptochrom (CRY), ein Molekül aus der Familie der Blaulichtrezeptoren, reguliert den circadianen (Schlaf-Wach-) Rhythmus bei Insekten. Darüber hinaus ist Cryptochrom magnetosensitiv, sobald es durch hochenergetisches Licht über den Radikalpaar-Mechanismus aktiviert wird [65]. CRY findet sich in den Augen und Gehirnen der meisten Insekten und Wirbeltiere, wo es als molekulare Uhr fungiert (siehe [66]). Anhand einer cryptochrommutanten *Drosophila* konnten Fedele et al. zeigen, dass Cryptochrom für die licht- und EMF-induzierte Verzögerung der circadianen Rhythmik not-

wendig ist [67]. Fogle et al. zeigten, dass CRY durch die Vermittlung von freien Radikalen (ROS) den spannungsgesteuerten Kaliumkanal $Kv\beta$ in den Schrittmacherneuronen von *Drosophila* öffnet, was dort zu einer erhöhten Feuerungsrate des Aktionspotenzials führt [36]. Sherrard et al. untersuchten die Produktion freier Radikale in *Drosophila* [68]. PEMF-Geräte („gepulstes elektromagnetisches Feld“) sind Spulen mit medizinischen Anwendungen, z.B. zur schnelleren Heilung von Wunden oder Knochenbrüchen [40]. Wildtyp *Drosophila* zeigte eine Aversionsreaktion und ROS-Bildung nach Bestrahlung mit einem 10 Hz PEMF. Dies war bei der CRY-defizienten *Drosophila*-Mutante nicht der Fall. Bei der Wildform wurde ein Effekt nur bei blauem oder weißem Licht festgestellt, da das Cryptochrom der Insekten für seine Aktivierung hochenergetische blaue Photonen benötigt. Im Gegensatz dazu scheinen *Pyrrhocoris* Feuerwanzen einen Mechanismus zu besitzen, um Cryptochrom nach der Lichtexposition für mehr als einen Tag im aktivierten Zustand zu halten, und es bleibt zu klären, wie vergleichbar die verschiedenen Insektenordnungen in dieser Hinsicht sind [69]. Mit Zellkulturen des Eulenfalters *Spodoptera frugiperda* wurde gezeigt, dass CRY für die Bildung freier Radikale notwendig ist, wenn sie mit PEMF-Spulen behandelt werden, und dies könnte für alle NF-EMF-Quellen gelten [68]. Die Aktivierung von Cryptochrom durch EMF, die bei Vögeln und Insekten nachgewiesen und weitgehend aufgeklärt ist, führt zur Öffnung von VGCCs in den Uhrenneuronen in *Drosophila* (Abb. 1). Da diese Neuronen die Zellteilung im gesamten Körper regulieren, deutet dies auf einen krebsfördernden Effekt hin, der bereits *in vitro* gezeigt wurde [70–72].

Magnetit

Alle Insekten besitzen Cryptochrome in ihren Augen und im Gehirn. Cryptochrome in den Augen funktionieren nur bei blauem Licht als Magnetsensoren (bei Vögeln bei rotem Licht). Insekten, die im Dunkeln aktiv sind, scheinen stattdessen einen Magnetit-basierten Magnetsensor zu verwenden; Dies wurde bei Bienen, Ameisen und Termiten experimentell bestätigt [60, 73, 74]. Bei Honigbienen führen Veränderungen in der Größe der Magnetitkristalle zu einer Freisetzung von Kalzium [75]. Termiten und Schaben nutzen eine Kombination aus CRY und Magnetit für ihre Orientierung - CRY bei Tag, Magnetit bei Nacht oder im Dunkeln [76–79].

Frühere Reviews, deren Referenzen in diesem Review einbezogen wurden

Cucurachi: „Insekten sind aufgrund ihrer begrenzten Größe, ihres kurzen Lebenszyklus und der Möglichkeit, Entwicklungsfehler leicht zu erkennen, ein nützliches Zielsystem für die Untersuchung von HF-EMF [80].“

Balmori: Balmori erwähnt, dass seit langem bekannt ist, dass Insekten auf (nicht-thermische) elektromagnetische Strahlung im Mikrowellenbereich reagieren, da dies erstmals vor 50 Jahren von Carpenter und Livstone beschrieben wurde [81, 82]. Gepulste Mikrowellenstrahlung von Handys oder WLAN stört die Entwicklung von *Drosophila* Fruchtfliegen und führt zu verminderter Fruchtbarkeit und erhöhter Mutationsrate. Diese Effekte wurden von mehreren Forschungsgruppen dokumentiert [83–85].

Levitt et al.: Dreiteilige Übersicht über die Auswirkungen von EMF auf Flora und Fauna [86]. Teil zwei erörtert die Auswirkungen von EMF auf Tiere und führt, unter einer Gesamt-

zahl von 675 Referenzen, 140 Referenzen auf, die sich mit Insekten befassen. Zitat: „Man nimmt an, dass viele Verhaltensaspekte in der Biologie sowohl mit den natürlichen Feldern der Erde als auch mit Schumann-Resonanzen synchronisiert sind. Aber jetzt haben wir, zum ersten Mal in der Evolutionsgeschichte, die Erdoberfläche mit einer Decke aus künstlichen Energiefeldern überzogen, ohne zu wissen, welche Folgen das haben könnte.“

EKLIPSE-Bericht und Vanbergen et al.: Ein ausführlicher Bericht wurde im Auftrag der englischen NGO „Bug-Life“ verfasst [87, 88]. 39 Studien wurden nach ökologischen Aspekten bewertet, davon 26 zusätzlich nach technischen Aspekten. Vanbergen et al., die zum EKLIPSE-Bericht beigetragen haben, bewerteten nur das Risiko für bestäubende Insekten und schlossen damit die meisten EMF-Studien bei Insekten aus [89]. Die Autoren betonen die nachgewiesene Schädlichkeit von künstlichem Licht bei Nacht und behaupten, dass die einzige bisher eindeutig nachgewiesene Wirkung der vom Menschen verursachten elektromagnetischen Strahlung die Störung der Orientierung sei [90–92]. Dies ist eine bloße Meinung der Autoren, die nicht wissenschaftlich untermauert ist, wie weiter unten erläutert wird.

Methoden

Literatursuche

Es wurde eine Literaturrecherche in der Datenbank EMF-Portal durchgeführt [93], unter Verwendung der folgenden Suchbegriffe: „insect drosophila bee apis pollinator ant termite locust cockroach“ (getrennt durch „oder“). Die Referenzen der oben aufgeführten Übersichten wurden extrahiert und mit Hilfe von JabRef in eine gemeinsame Bibliographie integriert. Eine Google Scholar- und Pubmed Central-Suche der Jahre 2012–2022 wurde separat mit den folgenden Suchbegriffen durchgeführt: jeweils einer von „insect; drosophila; bee; apis; pollinator; ant; termite; locust; cockroach“ und alle folgenden Wörter (getrennt durch „oder“): „EMR; EMF; electromagnetic field; electromagnetic radiation; electromagnetic; high frequency; HF; low frequency; LF; WLAN“.

Methodik für die Auswahl der Studien

Die Titel und Zusammenfassungen aller Einträge wurden gelesen und Einträge, die weder in englischer noch in deutscher Sprache verfasst waren oder nicht zum Thema gehörten, wurden ausgeschlossen. Dann wurden die Artikel im Volltext gesichtet, und nur diejenigen, die Experimente mit EMF auf Insekten beschreiben, die nicht älter als 1980 sind und nicht-thermische Wirkungen betreffen, wurden berücksichtigt. Die Studien wurden auf der Grundlage der vorgelegten Messungen der Gewebetemperatur oder der angegebenen Leistungsdichten, die in den Experimenten verwendet wurden, als nicht-thermisch eingestuft, wenn sie unter den ICNIRP-Grenzwerten lagen [94]. Einige der Studien zum Magnetsinn wurden für die Einleitung verwendet, aber nicht für die weitere Analyse.

Bewertung der Qualität

Die Studien wurden einer Qualitätsbewertung unterzogen, bevor sie in das Review aufgenommen wurden. Die von der Task Force of Academic Medicine und dem GEA-RIME-Komitee veröffentlichte Checkliste für Überprüfungskriterien wurde zu diesem Zweck in der von Bertagna et al. angepasst-

ten Form verwendet. [55, 95]. Alle für das Thema relevanten Studien wurden vom Hauptautor anhand von 13 vorgegebenen Kriterien auf ihre Qualität überprüft, und diejenigen, die mindestens 11 der 13 Kriterien erfüllten, wurden eingeschlossen [55].

Datenextraktion und -verarbeitung

Alle in das Review einbezogenen Studien wurden ausgewertet und die Daten wurden in je einer Tabelle für HF- und NF-EMF erfasst. Das Datenformat der ORSAA-Datenbank wurde verwendet, um sowohl die verwendeten EMF-Quellen, die Feldstärken und die Dauer der Experimente als auch die biologischen Befunde zu erfassen [96]. Zusätzliche Spalten für die Größe des Effekts (als prozentuale Veränderung im Vergleich zur Kontrolle) und die Richtung des Effekts (schädlich, vorteilhaft, unsicher, keine) wurden hinzugefügt. Die Richtung der Wirkung wurde auf der Grundlage des Urteils der jeweiligen Studienautoren oder eines allgemeinen Verständnisses der Biologie (z. B. erhöhte Sterblichkeit oder Auftreten von Mutationen als schädlich) oder auf der Grundlage von Begleitvariablen, die die Studienautoren gemessen hatten, bestimmt. So wurde z. B. erhöhter oxidativer Stress in der Regel als „unsicher“ eingestuft, es sei denn, es wurde gleichzeitig eine verringerte Fortpflanzungsfähigkeit oder DNA-Schädigung beobachtet; in diesem Fall wurde er als „schädlich“ eingestuft. Wenn möglich, wurden die extrahierten Daten mit bereits in der ORSAA-Datenbank erfassten Werten verglichen. Die Expositionszeiten wurden in Stunden umgerechnet und die Feldstärken oder Leistungsdichten in V/m, sofern möglich, unter Verwendung der im Anhang aufgeführten Formeln.

Die Schätzungen der Effektgröße wurden durch Umrechnung der prozentualen Veränderungen in das Verhältnis der Mittelwerte („ratio of means“, ROM) ermittelt und normalisiert und zwar durch Umkehrung des Mittelwertverhältnisses im Falle einer Verringerung. So wurde eine Abnahme von 50% als ein Mittelwertverhältnis von 0,5 gezählt, und der Kehrwert davon, 2, wurde als Schätzwert für die Effektgröße notiert. Auf diese Weise konnte die Zunahme eines Toxizitätsindikators, wie z. B. erhöhte DNA-Schäden in den Eierstöcken, mit der Abnahme eines anderen Toxizitätsindikators, wie etwa eine verringerte Fortpflanzungsfähigkeit, verglichen werden [97]. Die Effektgrößen von Experimenten mit vorteilhaften, d. h. nützlichen Auswirkungen wurden invertiert, so dass alle schädlichen Auswirkungen einen ROM > 1 und alle nützlichen Auswirkungen einen ROM < 1 haben. Die beobachteten Bioeffekte wurden in die folgenden Kategorien eingeteilt: verringerte Fortpflanzungsfähigkeit (Schädigung von Ei- oder Samenzellen, verringerte Zahl der gelegten Eier oder der Nachkommen), Auswirkungen auf die Entwicklung (verzögerte oder beschleunigte Larvalentwicklung, Auftreten von Mutationen), DNA-Schäden, veränderte DNA oder DNA-Transkription, veränderte Enzymaktivität oder veränderter Stoffwechsel, oxidativer Stress, verändertes Verhalten (Geschwindigkeit der Fortbewegung, Reaktionsgeschwindigkeit, Orientierung, Reaktion auf Pheromone), beeinträchtigtes Gedächtnis, sonstiges. Eine Störung des Richtungs- oder Orientierungssinns wurde unter „verändertem Verhalten“ erfasst [89]. Die Daten wurden in RStudio dargestellt.

Datensynthese und statistische Analyse

Eine Minderheit der Studien verfügte über vollständige statis-

tische Informationen, die für die Metaanalyse benötigt wurden, und es war möglich, Standardfehler aus p-Werten für eine größere Anzahl von Studien abzuleiten (R-Paket „dmetar“). Experimente, die eine Effektgröße lieferten, aber als „nicht statistisch signifikant“ oder „kein Effekt“ deklariert wurden, erhielten einen p-Wert von 0,5. Eine Metaanalyse wurde für alle HF-EMF-Studien durchgeführt, die reproduktive Effekte bei *Drosophila* fanden, da dies die Untergruppe mit der höchsten Anzahl von Studien ist. Außerdem war es möglich, für die in Studien am häufigsten verwendeten Geräte Schätzungen der gepoolten Effektgrößen durch eine Metaanalyse abzuleiten, unter Verwendung der R-Pakete „meta“ und „bayesmeta“ [98, 99]. RStudio wurde für die Datensynthese, die Analyse und die Diagramme verwendet.

Ergebnisse

Die Literatursuche im EMF-Portal lieferte 413 Ergebnisse. Die Bibliografien früherer Übersichten und die Literatursuche in Pubmed und Google Scholar ergaben zusammen 291 Studien. Nach dem Entfernen von Duplikaten ergaben sich insgesamt 585 Einträge, die wie folgt und wie im PRISMA-Flussdiagramm beschrieben behandelt wurden (Abb. 1).

Auswahl der Studien

130 Studien über Experimente mit EMF bei Insekten, die nach 1980 veröffentlicht wurden, wurden einer Qualitätsbewertung unterzogen. 3 HF-Studien, bei denen es sich um Computersimulationen handelt, wurden gesondert behandelt [100–102]. Diese Studien sind prospektiver Natur und lieferten keine Datenpunkte für die Diagramme, lieferten jedoch Informationen über die in der Zukunft zu erwartenden Auswirkungen. 11 Studien wurden wegen qualitativer Mängel (fehlende EMF-Messungen, schlechtes experimentelles Vorgehen, unzureichende Versuchsplanung, schlechte Datenverarbeitung oder fehlende Berichterstattung über statistische Analysen) ausgeschlossen (vgl. ergänzende Tabellen 1 und 2). 119 Studien (64 NF-Studien, 55 HF-Studien) mit Experimenten zu EMF bei Insekten wurden einer Datenextraktion unterzogen und in zusammenfassende Tabellen aufgenommen (vgl. ergänzende Tabellen 3–6).

Trends

185 Arbeiten (einschließlich Übersichten) über die Auswirkungen von EMF auf Insekten und 145 Studien über die magnetische Wahrnehmung von Insekten sind seit 1980 veröffentlicht worden (Abb. 2). Die Trends deuten auf eine leichte Zunahme des Interesses an diesem Thema hin, aber wahrscheinlich mangelt es an Bewusstsein für die biologischen Auswirkungen von EMF im Allgemeinen, da es in den meisten Lehrplänen der Universitäten nicht enthalten ist und Kenntnisse in mehreren Bereichen erfordert. Darüber hinaus ist der Bereich der EMF-Forschung unterfinanziert und gilt als umstritten.

Die Mehrzahl der Studien wurde mit *Drosophila*-Fruchtfliegen oder Honigbienen durchgeführt (Abb. 3A). Im Allgemeinen wurden Handys, Spulensysteme oder Signalgeneratoren verwendet (Abb. 3B). Helmholtzspulen sind mit Netzstrom betriebene Drahtspulen, die niederfrequente EMF von 50 Hz aussenden. In 70% der Studien, die ein Spulensystem verwendeten, wurden Helmholtz-Spulen eingesetzt. Eine Minderheit von Studien verwendete jedoch Merritt-Spulen, So-

lenoide oder einzelne elektromagnetische Spulen: Alle diese Studien wurden unter der Kategorie „Spulensystem“ zusammengefasst. Signalgeneratoren sind im einfachsten Fall Oszilloskope, die so konfiguriert sind, dass sie hochfrequente Signale erzeugen, mit ähnlichen Signaleigenschaften wie drahtlose Kommunikationssysteme (WLAN, Mobilfunk 1G bis 5G usw.). Das Signal wird normalerweise in eine Hornantenne eingespeist, um HF-EMF abzustrahlen.

In den HF-EMF-Studien lagen die Strahlungsintensitäten (oder elektrischen Feldstärken) zwischen 0,00005 und 38200 mW/m², bzw. 0,0043 bis 120 V/m (Abb. 4). Die Dauer der Exposition der Insekten reichte von 30 Sekunden bis zu 8,5 Monaten. Aus den Größen Feldstärke und Expositionsdauer

konnte die Strahlendosis berechnet werden. 64 % der Experimente zeigten eine Effektgröße an, 51 % der Experimente zeigten auch einen p-Wert an, während 23 % darüber hinaus Standardabweichungen oder Standardfehler angaben. Durch die Ableitung der Standardfehler aus p-Werten konnten 53 % der Experimente bzw. 39 % der Studien in die Metaanalyse einbezogen werden. Bei fast keiner der einbezogenen Studien handelt es sich um randomisierte kontrollierte Studien (RKS). Eine Metaanalyse aus dem Jahr 2014, in der RKS mit reinen Beobachtungsstudien verglichen wurden, kommt jedoch zu dem Schluss, dass solche Studien genauso gut wie RKS sind, wenn es darum geht, Effekte in der realen Welt zu finden und zu ermessen [103].

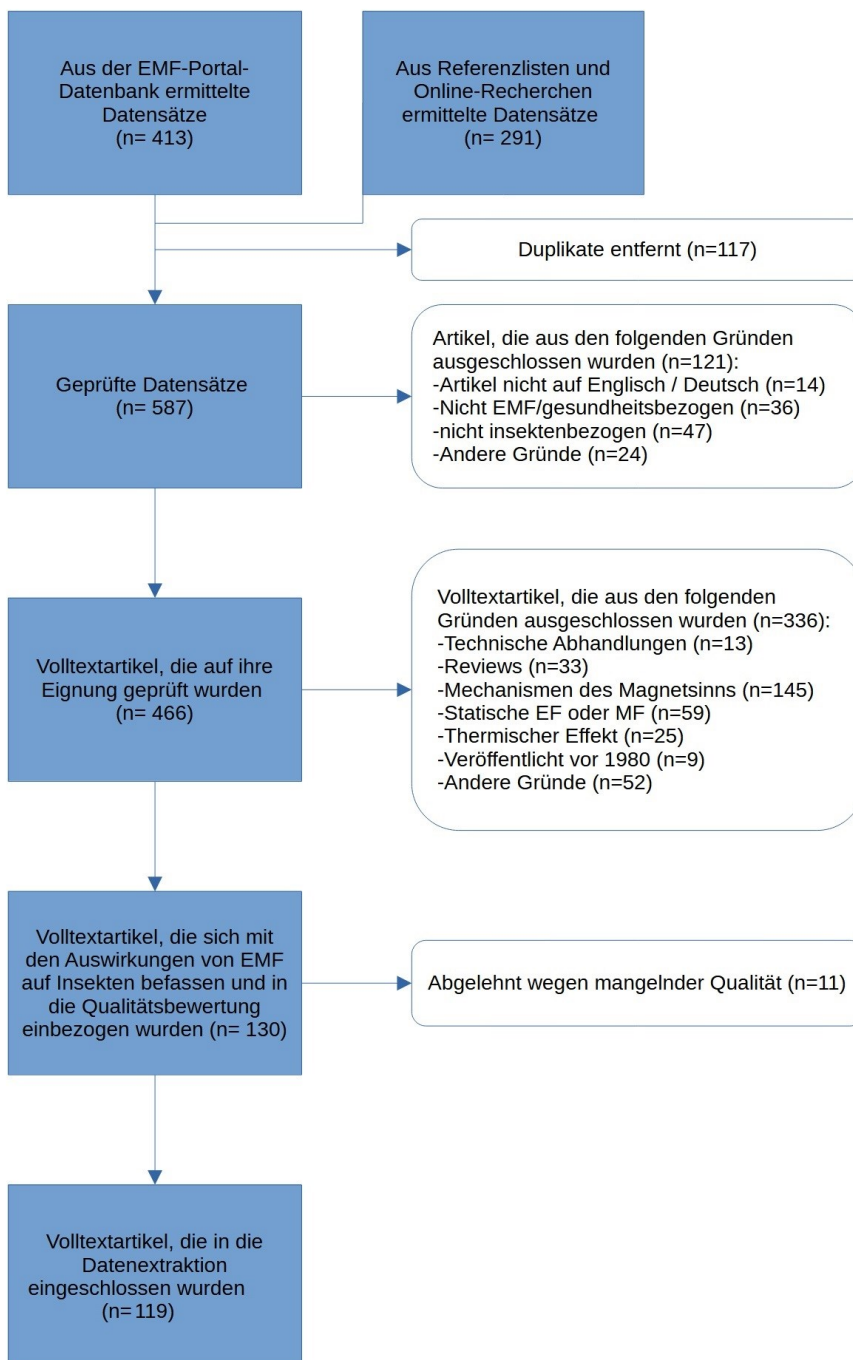


Abbildung 1: PRISMA-Flussdiagramm für die Auswahl von Studien

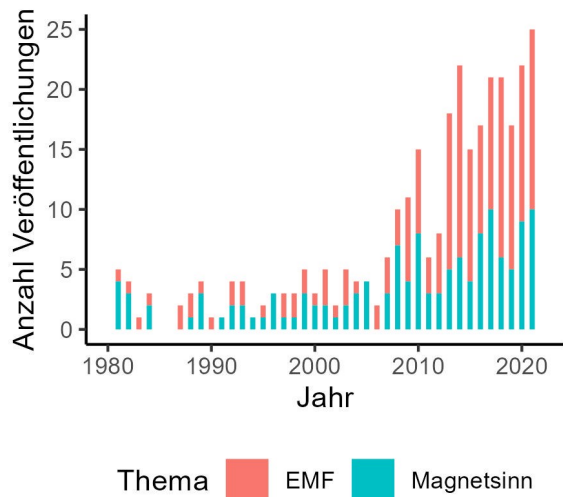


Abbildung 2: Anzahl der Veröffentlichungen über Insekten pro Jahr nach Themen.

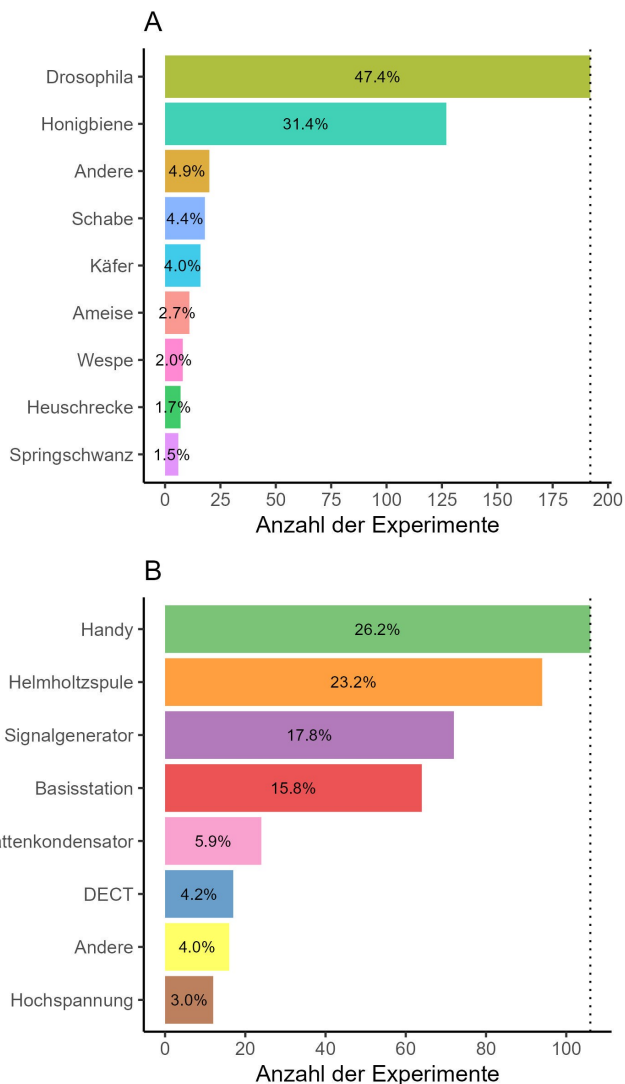


Abbildung 3: Anzahl und Prozentsatz der veröffentlichten experimentellen Ergebnisse nach Insektenarten oder Insektengruppen (A) und den in den Experimenten verwendeten EMF-Quellen (B).

Wahrscheinlichkeit der Toxizität und geschätzte Effektgröße der Toxizität

Was die Toxizität verschiedener EMF-Quellen betrifft (Abb. 5), scheinen die HF-Geräte Schnurlostelefon (DECT), Mobiltelefon und Signalgenerator ähnlich toxisch zu sein. Basisstationen scheinen weniger schädlich zu sein als Mobiltelefone, obwohl beide die gleiche Technologie verwenden. Diese Diskrepanz ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass Studien über Mobiltelefone in der Regel Laborstudien in einer kontrollierten Umgebung mit relativ hohen Feldstärken sind, während es sich bei den Studien über Basisstationen um Feldexperimente handelt, in der Regel bei viel geringeren Feldstärken oder mit einer Expositionsdauer, die zu kurz ist, um Langzeiteffekte festzustellen (siehe Diskussion). Die Feldstärke des Signals der Mobilfunktürme lag im Durchschnitt im Bereich von 0,56 V/m (Medianwert 0,32 V/m), während die Feldstärke von Mobiltelefonen im Durchschnitt 18,7 V/m betrug (Medianwert 16,2 V/m) (Abb. 4). Umgerechnet in Leistungsdichten (Medianwerte) ist der quantitative Unterschied leichter zu fassen. Mobilfunkturn: 0,27 mW/m²; Handy: 695 mW/m². Die derzeit typischen Feldstärken von Mobilfunktürmen sind weniger schädlich als die von Mobiltelefonen, DECT und WLAN. Die derzeitigen experimentellen Belege aus den Untersuchungen an Basisstationen sollten nicht dahingehend interpretiert werden, dass die Auswirkungen per se schwach sind, sondern dass der Versuchsaufbau im Allgemeinen so war, dass nur relativ schwache Leistungsdichten getestet wurden (typischerweise in 100 bis 500 m Entfernung vom Sender), während Insekten viel höheren Leistungsdichten ausgesetzt sein können, wenn sie näher an die Antennen herankommen. Bei Experimenten mit Mobiltelefonen wurden häufig schädliche Auswirkungen innerhalb von 10 Minuten nach der Bestrahlung festgestellt, wohingegen bei Feldexperimenten an Basisstationen schädliche Wirkungen in der Regel erst nach mehreren Wochen oder Monaten festgestellt wurden (vgl. Diskussion). Einige neuere epidemiologische Studien am Menschen und Feldstudien an Insekten, Vögeln und Kiefern in der Umgebung von Mobilfunktürmen deuten jedoch auf chronische schädliche Auswirkungen hin, selbst bei den derzeitigen Leistungspegeln [104–109].

Die aus der Metaanalyse abgeleiteten Toxizitätsschätzungen liegen für die HF-EMF-Geräte bei einem Verhältnis der Mittelwerte von etwa 1,5 (s. ergänzende Abb. 15, 16, 17, ergänzende Tabelle 1). Diese Schätzung umfasst alle Arten von beobachteten Bioeffekten, die eindeutig als schädlich oder nützlich eingestuft werden können (Abb. 6), und könnte im schlimmsten Fall als eine 50%ige Zunahme von DNA-Schäden oder eine 33%ige Verringerung der Fortpflanzungsfähigkeit interpretiert werden. Die Schätzung der Toxizität für Basisstationen liegt bei 1,49 (ergänz. Abb. 13). Diese Schätzung beinhaltet auch Ergebnisse, die eine Vermeidung von Insekten oder eine verringerte Abundanz von Insekten in der Nähe von Basisstationen beobachtet haben, und es sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die tatsächlichen Auswirkungen der Vermeidung von Basisstationen durch Insekten zu klären, aber Verhaltenseffekte sollten nicht unterschätzt werden [110]. Eine Schätzung, die nur auf direkten Markern der Toxizität beruht (wie verringerte Brut, Eiablage usw.), ergab eine deutlich geringere Toxizität von 1,09, was einer Verringerung der Fortpflanzungsfähigkeit um 8% entspräche (ergänz. Abb. 14). Die Toxizitätsschätzungen sind statistisch hoch signifikant für DECT, Mobiltelefone und die HF-Signalgeneratoren, kaum signifikant für Spulensysteme und nicht signifikant für Basis-

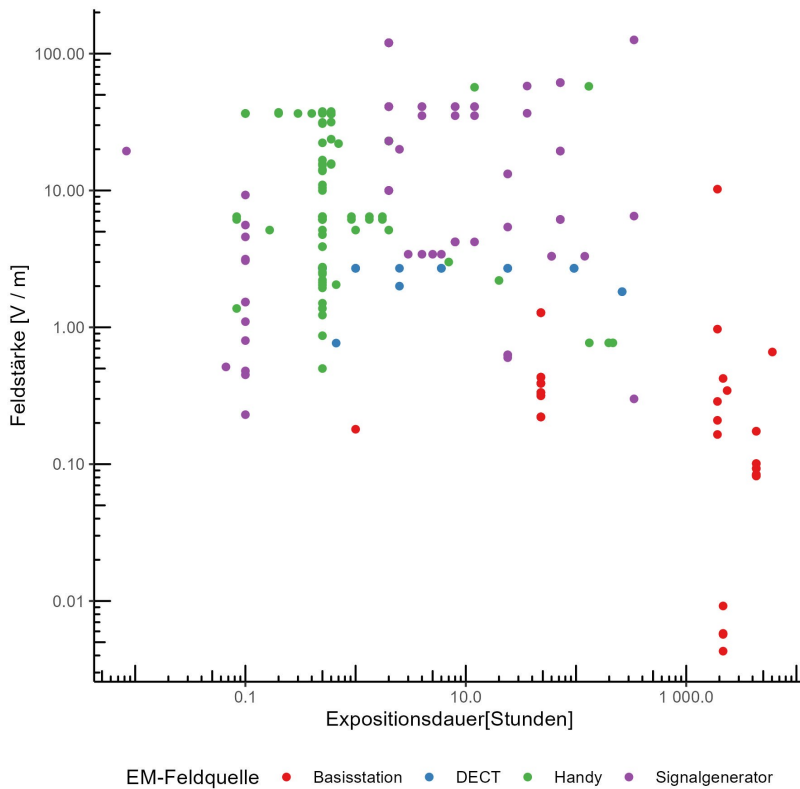


Abbildung 4: EMF-Feldstärke in Abhängigkeit von der Expositionsdauer (Datenpunkte aus 239 Experimenten oder Versuchsgruppen in 48 HF-EMF-Studien).

stationen. Die Walddiagramme zeigen eine erhebliche Heterogenität zwischen den Studien (I^2 typischerweise $> 90\%$), und breite Vorhersageintervalle, die den Bereich der beobachteten Effektgrößen beschreiben. Dies könnte auf große Unterschiede bei den gemessenen Parametern sowie bei der Stärke, Art und Dauer der EMF-Exposition zurückzuführen sein. Die Heterogenität könnte auch auf ein mangelndes Verständnis der zugrundeliegenden Wirkmechanismen hinweisen, was zu unangemessener Versuchsplanung führt (mit Ausnahmen), welche zu starken Unterschieden zwischen den experimentellen Befunden führt.

Die Ergebnisse der Metaanalyse für alle Experimente, in denen Reproduktionstoxizität bei *Drosophila* bei einer Feldstärke von über 7 V/m festgestellt wurde (ergänzende Abb. 10), liegen nahe bei denen für die Kohorte von Experimenten mit einer Feldstärke zwischen 2 und 7 V/m (ergänzende Abb. 11): Schätzung der Effektgröße: 1,40 bzw. 1,44, was einer um 29 bis 31% verringerten Fortpflanzungsfähigkeit entspricht ($p = 0,01$). Die Metaanalyse für alle Experimente, bei denen eine Reproduktionstoxizität bei weniger als 2 V/m festgestellt wurde (ergänzende Abb. 12) weist auf eine geringere Toxizität hin, mit einer Effektgröße von 1,22, was einer Verringerung der Reproduktionsfähigkeit um 18% entspricht ($p = 0,03$). In den ergänzenden Tabellen 1 und 2 sind alle Schätzungen aufgeführt, die durch eine geclusterte, dreistufige Metaanalyse bzw. Bayes'sche Metaanalyse ermittelt wurden.

Zusammenfassung der Studienergebnisse

In den 1970er und 1980er Jahren wurde eine Reihe von Studien über die Auswirkungen von Stromleitungen auf Honigbienen durchgeführt [111–115]. Die meisten späteren Studien verwendeten Helmholtz-Spulen oder andere Spulensysteme

im Labor, die eine einfachere Kontrolle der Versuchsparameter ermöglichen. Spulen erzeugen viel stärkere Magnetfelder, aber schwächere induzierte elektrische Felder, im Vergleich zu HF-EMF-Quellen [116–118].

Die in den HF-Versuchen verwendeten Frequenzen verteilen sich wie folgt: 55% der HF-Experimente nutzten Frequenzen im Bereich von 900 MHz, was dem GSM- (2G) und LTE- (4G) Mobilfunkstandard entspricht. 8% nutzten 1900 MHz (DECT), 7,6% nutzten 1800 MHz, was dem DCS (2G, E-Netz) entspricht, und 3,6% nutzten 3500 MHz, wie Low-Band 5G.

Die in den Experimenten beobachteten biologischen Wirkungen von NF- und HF-EMF unterschieden sich deutlich (Abb. 5, 6, 7), was auf unterschiedliche biologische Ziele für NF-EMF-Spulensysteme im Vergleich zu HF-EMF hinweisen könnte. Dies könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass Spulen normalerweise mit Wechselstrom-Sinuswellen betrieben werden, während HF-EMF-Geräte gepulste Trägersignale verwenden. HF-Signalgeneratoren verwendeten in 21% der Versuche ein gepulstes Signal, in 17% ein frequenzmoduliertes 50-kHz-Signal und in 61% der Versuche ein kontinuierliches Sinussignal.

Bei den HF-EMF waren die beobachteten Wirkungen überwiegend schädlich (57%). Etwa ein Viertel wurde als ungewisse Wirkung eingestuft (z. B. erhöhte oder verringerte Fortbewegung). Bei den NF-EMF (133 Experimente) wurde in 29% der Experimente ein Verhaltenseffekt beobachtet, in 12% der Experimente betraf die Wirkung den Stoffwechsel und in 11% war die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigt. Bei HF-EMF (238 Experimente) wurden die folgenden Trends beobachtet: verminderte Fortpflanzungsfähigkeit in 37% der Experimente, verändertes Verhalten (18%), oxidativer Stress (10%), DNA-Schäden (7%) und beeinträchtigte Entwicklung (5%). In 10% der Experimente konnte keine Wirkung festgestellt werden; diese höhere Zahl als bei NF-EMF (6%) ist wahrscheinlich da-

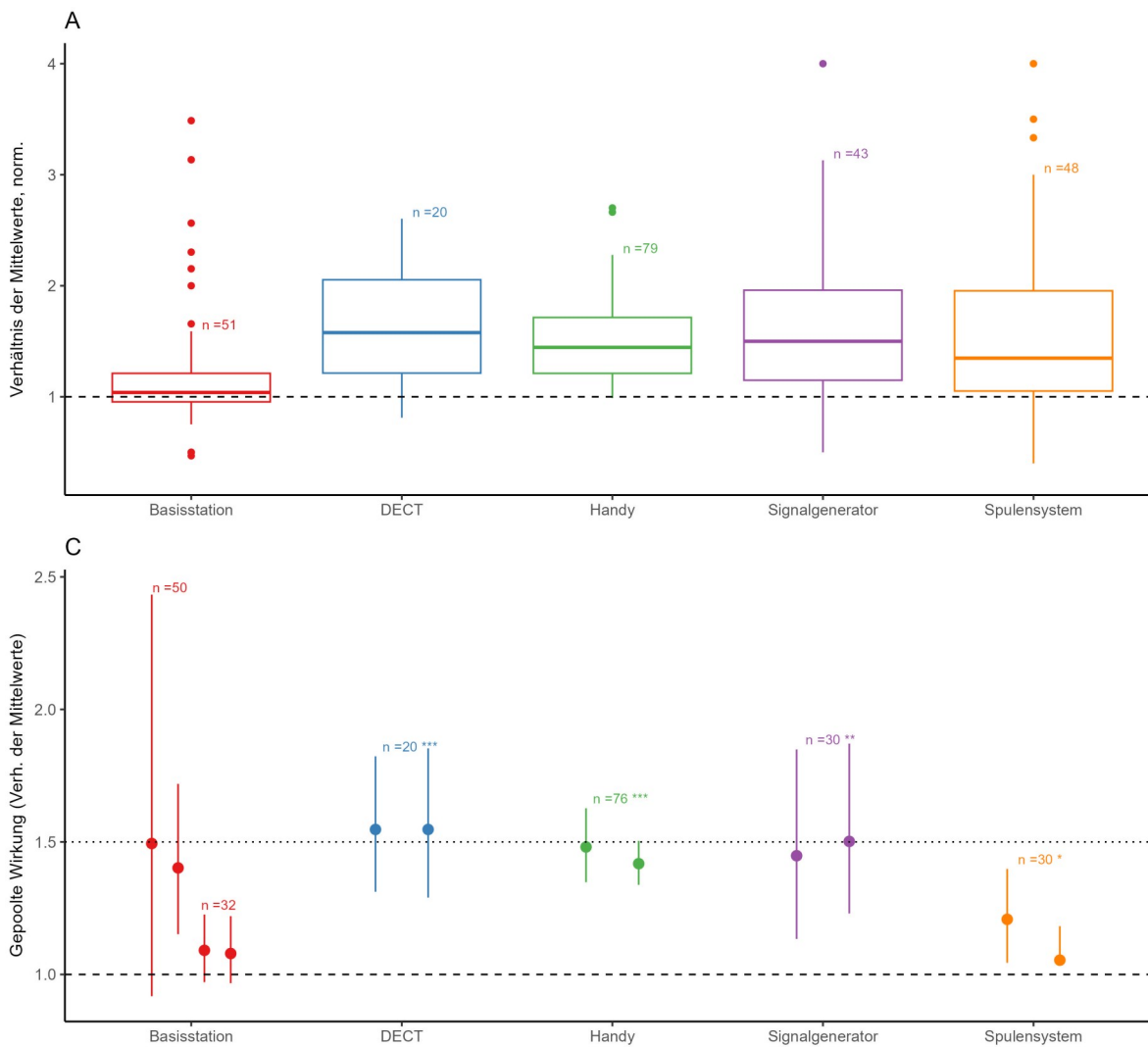


Abbildung 5: (A) Boxplots (Median und Quartile) der in den Experimenten gefundenen Effektgröße nach EMF-Typ, angegeben als normiertes Verhältnis der Mittelwerte (ROM), mit Angabe der Anzahl n der Experimente. $ROM > 1$ deutet auf schädliche Wirkungen hin. (B) Aus der Metaanalyse abgeleitete Schätzung der Toxizität, wobei die Effektgröße als Verhältnis der Mittelwerte mit einem 95-prozentigen Konfidenzintervall angegeben ist (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ & *** $p < 0,001$). Schätzung aus „geclusterte“ Drei-Ebenen-Analyse (R-Paket „meta“) neben Bayes'scher Schätzung (R-Paket „bayesmeta“), mit Angabe der Anzahl n der Experimente, aus denen die Schätzung abgeleitet ist. Für die Basisstationen: Schätzungen, die alle Befunde einer reduzierten Abundanz oder eines veränderten Verhaltens beinhalten (links) und Schätzungen, die nur auf toxikologischen Befunden basieren (rechts).

rauf zurückzuführen, dass mehrere HF-Studien Feldstudien mit Basisstationen waren, die mit niedrigen Feldstärken durchgeführt wurden und dass es einfacher ist, signifikante Ergebnisse in Laborstudien zu finden.

Diskussion

In der überwiegenden Mehrheit der Studien wurden Auswirkungen festgestellt, die im Allgemeinen schädlicher Art sind. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Befunde das Ergebnis eines Zufalls sind. Skeptiker könnten einwenden, dass es sich bei den meisten Studien nicht um randomisierte kontrollierte Studien handelte (siehe aber hier [103]). Trotz dieser Unzulänglichkeiten sind die konsistenten Ergebnisse zahlreicher Studien, die von verschiedenen Forschergruppen mit unterschiedlichen Protokollen durchgeführt wurden, ein unwiderlegbares Argument für schädliche Auswirkungen von NF- und HF-EMF niedriger Leistung auf Insekten [86, 119]. Dies

wird auch durch einen kürzlich vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Auftrag gegebenen Bericht bestätigt [120]. HF-EMF scheinen im Vergleich zu NF-EMF stärkere und schädlichere Auswirkungen auf Insekten zu haben. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die im Labor gezeigten Effekte auch unter realen Bedingungen auftreten [110]. Eine Zusammenfassung und Chronik einzelner Studien an Insekten ist in den ergänzenden Materialien und in anderen Reviews zu finden [86, 105, 121]. EMF-Bioeffekte sind auch bei Pflanzen und allen untersuchten Tieren sowie beim Menschen nachgewiesen worden [86, 122–124]. Es ist jedoch zu erwarten, dass Insekten am stärksten betroffen sein werden, da sie bereits unter dem Druck mehrfacher Bedrohungen stehen, allgemein weniger widerstandsfähig gegenüber Stressoren und Schadstoffen sind als größere Tiere und aufgrund ihrer geringen Größe anfälliger für immer höhere Frequenzen sind, die von der Mobilfunkinfrastruktur genutzt werden (5G und 6G in der Zukunft) [12, 100, 125].

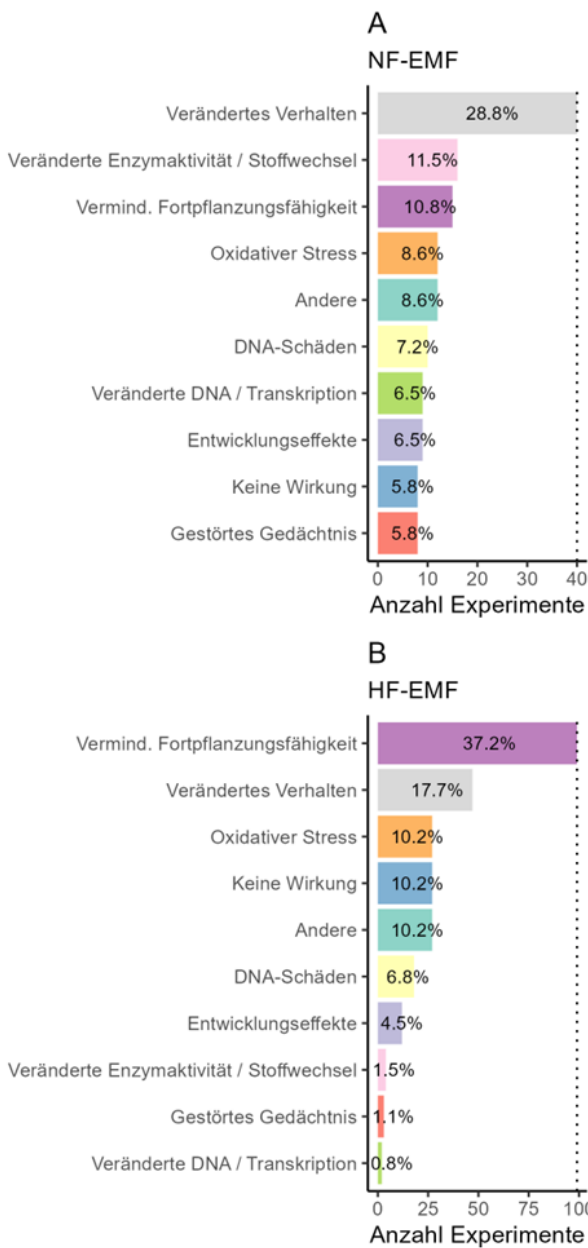


Abbildung 6: Anzahl und Prozentsatz der Experimente, in denen biologische Wirkungen von EMF auf Insekten festgestellt wurden, aufgeschlüsselt nach Kategorien, (A) niederfrequente EMF, (B) hochfrequente EMF.

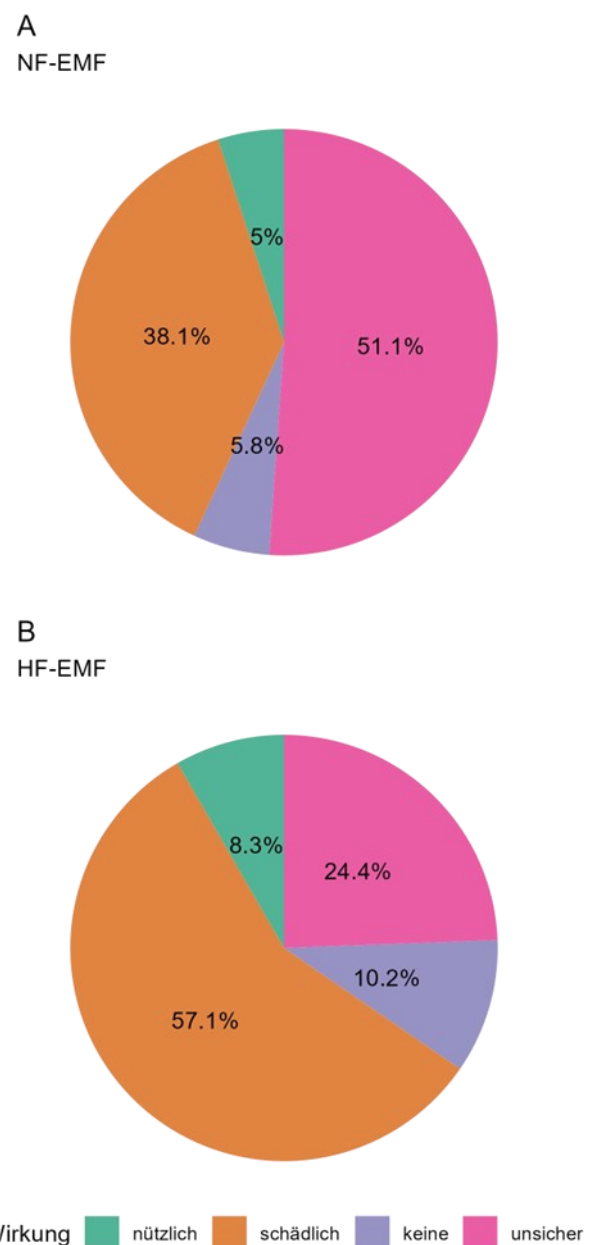


Abbildung 7: Prozentsatz der Experimente, in denen biologische Wirkungen von EMF auf Insekten festgestellt wurden, aufgeschlüsselt nach Wirkungsrichtung, (A) niederfrequente EMF, (B) hochfrequente EMF.

Vergleich zwischen dem Problem des künstlichen Lichts bei Nacht und elektromagnetischen Feldern

Verschiedene Faktoren, die eine Gefahr für die Umwelt und die Biodiversität darstellen, haben in letzter Zeit das Interesse von Forschern und politischen Entscheidungsträgern geweckt, z.B. anthropogener Lärm und künstliches Licht in der Nacht [126, 127]. Bei der elektromagnetischen Verschmutzung ist dies noch nicht der Fall, auch wenn diese in den letzten Jahren exponentiell zugenommen hat [15, 86, 128].

Hier vergleichen wir die Auswirkungen von künstlichem Licht bei Nacht (KLBN) mit denen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) der drahtlosen Kommunikation.

Licht hat die Entwicklung und Organisation biologischer Systeme von der molekularen Ebene bis hin zu Ökosystemzyklen vorangetrieben. Außerdem hat sich das Leben in einer Matrix aus relativ schwachen, natürlichen elektromagnetischen und geomagnetischen Feldern entwickelt. KLBN ist völlig neuartig und wurde an Orten, zu Zeiten und in einer Intensität eingeführt, die in der Natur nicht vorkommen, und mit einem anderen Spektrum als dem des Sonnenlichts [127]. Auch die vom Menschen verursachten EMF wurden weltweit rasch eingeführt, und zwar in einer Intensität, die weit über den natürlichen Werten liegt. Anthropogene EMF sind polarisiert, gepulst, moduliert und beinhalten extrem niedrige Pulsfrequenzen, während die natürlichen EMF diese Merkmale nicht aufweisen [128]. Die Lichtverschmutzung hat in den letzten 100 Jahren zugenommen, während die Entwicklung des Mobilfunks (und anderer drahtloser Technologien) erst vor wenigen

Jahrzehnten begann. HF-EMF wurden weltweit sehr schnell eingeführt, und die Exposition hat um einen Faktor von etwa 10^{18} zugenommen im Vergleich zu natürlichen Umgebungswerten [15]. Die physiologischen und verhaltensbezogenen Auswirkungen von KLBN und HF-EMF sind umfassend dokumentiert, aber das Ausmaß, in dem sich dies in Auswirkungen auf Populationen und Ökosysteme niederschlägt, ist nach wie vor kaum bekannt [86, 127, 129].

Allgemeine Überlegungen

Vieles deutet darauf hin, dass medizinische Anwendungen von EMF nur darauf warten, entwickelt zu werden [130–133]. Obwohl in einem früheren Review vor medizinischen PEMF-Geräten gewarnt wurde (welche ein gepulstes elektromagnetisches Feld verwenden), werden PEMF-Geräte inzwischen mit Erfolg eingesetzt, obwohl ihr Wirkmechanismus nur teilweise aufgeklärt ist [134–136]. Dennoch sollte dies in einem medizinischen Kontext zweitrangig sein: Wenn ein Mittel oder Gerät bei einer bestimmten Krankheit, z. B. Krebs oder einer Virusinfektion, wirksam ist und keine schwerwiegenden Nebenwirkungen auftreten, sollte das Mittel eingesetzt werden. Umgekehrt sollten Mittel oder Technologien, die schwerwiegende unerwünschte Wirkungen haben, nicht eingesetzt werden. Auch wenn die derzeitigen drahtlosen Technologien in der Regel dosisabhängig toxisch sind, sollte es möglich sein, ihre Biokompatibilität deutlich zu verbessern, ähnlich dem, was bereits für Computer- und Fernsehbildschirme erreicht wurde, z.B. durch die Beseitigung des „biomimetischen“ niederfrequenten Pulsierens in drahtlosen Signalen [132, 137–139].

Ein Experiment an Schaben deutet darauf hin, dass das gleichzeitige Vorhandensein von statischen Magnetfeldern oder NF-EMF zusammen mit HF-EMF schädlicher ist als jedes für sich, wie es zuvor für Vögel gezeigt und von Warnke theoretisch postuliert worden war [140–142]. Es ist bisher unklar, ob EMF synergistisch mit Pestiziden toxisch sind, wobei einige Studien auf eine synergistische Toxizität hinweisen, andere jedoch nicht [143, 144].

Die meisten Studien, die in diese Übersicht aufgenommen wurden und einer Metaanalyse zugänglich waren, stammen von einer sehr produktiven Gruppe von Wissenschaftlern der Universität Athen. Eine neuere Studie aus Italien bestätigt jedoch die grundlegenden Mechanismen für die Toxizität, die von Panagopoulos et al. beschrieben und postuliert wurden. Demnach verursachen HF-EMF zunächst oxidativen Stress, der zu fehlerhaftem Transposon-Silencing und damit zu Chromosomenaberrationen und DNA-Schäden führt, was schließlich zu einer verminderten Fortpflanzungsfähigkeit und anderen schädlichen Auswirkungen führt [139, 145].

Bei welchen Feldstärken sind toxische Wirkungen bei Insekten zu erwarten?

Ein Blick zurück in die Geschichte der Wissenschaft zeigt, dass schädliche Wirkungen häufig schon früh gemeldet wurden, aber meist ignoriert wurden, z. B. in den Fällen von Asbest, Blei und Zigaretten. In der Regel hat es Jahrzehnte gedauert, bis man die Mechanismen der Toxizität verstanden und sich die offizielle Position geändert hat. Die Europäische Umweltagentur EEA hat mehrere Berichte zu diesem Thema unter dem Titel „Late lessons from early warnings“ [146, 147] erstellt. 36 der 55 Hochfrequenzstudien, über die in dieser Übersicht

berichtet wurde, verwendeten Feldstärken von weniger als 6 V/m (~ 100 mW/m²), und 31 dieser 36 Studien (86 %) fanden dennoch statistisch signifikante schädliche Wirkungen, die bei etwa 2 V/m beginnen und bei 6 V/m ihren Höhepunkt erreichen. Dies liegt unter den von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfohlenen Grenzwerten (41 V/m bzw. 61 V/m über 2 GHz) und sogar unter den besonders strengen Installationsgrenzwerten, die nur in einer Handvoll Ländern gelten [94]. (Der Installationsgrenzwert wird an Orten gemessen, an denen sich Menschen längere Zeit aufhalten, d. h. in Wohnungen, Schulen, an Arbeitsplätzen und auf Spielplätzen.)

Panagopoulos et al. entdeckten ein bioaktives Fenster in einem Abstand von 20–30 cm von GSM-Mobiltelefonen, wo die Leistungsdichte 100 mW/m² (~ 6 V/m) betrug und bei denen toxische Wirkungen bei *Drosophila* bereits nach einer 1-minütigen Exposition beobachtet wurden. Diese Ergebnisse wurden mehrfach repliziert [148–150]. Wenn dies generell auf Insekten zutrifft, läge der Grenzwert für toxische Wirkungen 100 Mal unter dem derzeitigen ICNIRP-Grenzwert (10 W/m² oder 61 V/m), der nur vor thermischen Wirkungen schützt, und möglicherweise 1000-mal niedriger als der derzeitige Grenzwert bei chronischer Exposition, d. h. 10 mW/m² oder 2 V/m (alle Vergleiche basieren auf Energie pro Flächeneinheit) [94]. In einer kürzlich durchgeführten Studie wurden signifikante Auswirkungen auf die Gentranskription und Chromosomenanomalien festgestellt unter Verwendung eines WLAN-Signals von 4,8 mW/m² oder 1,35 V/m bei *Drosophila*, die 9 Tage lang exponiert wurden [145]. Diese Erkenntnisse über biologische Wirkungen bei Insekten ab etwa 2 V/m implizieren, dass die bestehenden Normen überarbeitet und verschärft werden müssen, um die Belange des Naturschutzes und der Tierwelt zu berücksichtigen.

Die derzeitigen Leistungsflussdichten im öffentlichen Raum liegen im Allgemeinen noch unter 10 oder 100 mW/m² (d. h. 2 oder 6 V/m). In einer neueren Studie wurden im Feld Werte von 0,17–0,53 V/m (0,1–0,8 mW/m²) gemessen [101]. In der Umgebung von Schulen auf Kreta wurden hauptsächlich Werte im Bereich von 0,5–1 V/m festgestellt [151]. Bei landesweiten Messungen des National Observatory of electromagnetic fields (NOEF) in Griechenland wurden an 55% der Standorte Durchschnittswerte von über 1 V/m festgestellt und Werte von mehr als 2 V/m an 20% der Messstellen [152]. In einer kürzlich veröffentlichten Übersicht werden Leistungsichten von 0,23 V/m in dezentralen Schweizer Wohngebieten genannt und bis zu 1,85 V/m in einem australischen Universitätsviertel [86]. In städtischen Hotspots (Großbritannien) wurden maximal 150 mW/m² (7,5 V/m) und durchschnittlich 25 mW/m² (3,3 V/m) gemessen [153]. Die französische „Agence nationale des fréquences“ (ANFR) ermittelte einen Durchschnitt von 1,17 V/m an 1300 5G-Basisstationen, und die Autoren erwarten einen Anstieg um 20% in den nächsten Jahren [154]. In Belgien, Italien, der Schweiz, Russland und China liegt die Installationsgrenze für Mobilfunk-Basisstationen bei 6 V/m (100 mW/m²), wohingegen Deutschland, Großbritannien, die USA und viele andere Länder sich an die viel höheren ICNIRP-Grenzwerte halten [94, 155]. Die ICNIRP-Grenzwerte sind in letzter Zeit in Frage gestellt worden, da sie auf Erkenntnissen von vor mehr als 20 Jahren beruhen und ihre Annahmen sich als falsch erwiesen haben [156]. Darüber hinaus sind die ICNIRP-Grenzwerte auf den Schutz des Menschen ausgerichtet und wurden nicht auf ihre Eignung für den

Schutz von Wildtieren und Insekten hin geprüft [157].

In Zukunft

Die Mechanismen der biologischen Wirkungen, abgesehen vom magnetosensitiven Cryptochrom und HF-Wirkungen auf die Fortpflanzung, sind nur teilweise verstanden [65, 139, 145]. Zur Klärung der folgenden Fragen ist Grundlagenforschung zwingend erforderlich:

- inwieweit die durch HF- und NF-EMF ausgelösten biologischen Prozesse vergleichbar sind;
- inwieweit Interferenz- oder Synergieeffekte zwischen dem statischen Magnetfeld der Erde, vom Menschen verursachten NF-EMF und HF-EMF auftreten;
- inwieweit Erkenntnisse mit HF-EMF im Labor auf Mobilfunkmasten und auf neu entstehende EMF-Quellen wie das 5G-Hochfrequenzband übertragbar sind;
- wie hoch die Leistungsdichte in der natürlichen Umgebung ist (detaillierte EMF-Karten).

Im Vergleich zu den meisten Tieren sind Menschen recht widerstandsfähig, wenn es darum geht, wie viel Stress oder Toxine sie aushalten können, bevor sie klinische Symptome entwickeln, obwohl die Menschheit ihre vergleichsweise hohe Widerstandsfähigkeit regelmäßig überschätzt hat [158]. Viele Pestizide, die ursprünglich als harmlos für den Menschen galten, haben sich später als schädlich erwiesen, wie DDT, Organophosphate und Pyrethroide [159]. Insekten sind empfindlicher gegenüber Schadstoffen, einschließlich EMF, als Menschen [86, 120]. Gesunde Ökosysteme und eine nachhaltige Landwirtschaft brauchen Insekten. Obwohl ökologische Praktiken und die ökologische Landwirtschaft in Europa auf dem Vormarsch sind, werden wichtige Maßnahmen zum Schutz der Insektenpopulationen, wie das Verbot von Neonicotinoiden und die Reduzierung von Monokulturen, zu langsam umgesetzt [125, 160].

Nach Thielens et al. steigt die von Insektenkörpern absorbierte EMF-Leistung (bei gleicher Sendeleistung von 1 V/m) bei einer Frequenzänderung von ~ 1 GHz (z. B. 4G und Low-Band 5G) auf 10 GHz und höher um das Hundertfache an, z. B. beim High-Band 5G bei 26 GHz, daher ist eine Zunahme der negativen Auswirkungen auf Insekten zu erwarten, da auch nicht-thermische Effekte von der absorbierten Leistung abhängen [100–102]. Da die Leistungsverluste aufgrund von Streuung, Reflexion und des geringeren Durchdringungsvermögens höherer Frequenzen größer werden, muss auch die abgestrahlte Leistung der Basisstationen steigen, um komfortable drahtlose Verbindungen in Haushalten und Fahrzeugen zu gewährleisten. Der 5G-Ausbau führt zu einem erheblichen Anstieg der EMF-Emissionen, wie jüngste Messungen nahelegen [152, 154, 161].

Auf der Grundlage einer Bewertung der Gesamtsituation der Studien über Insekten muss vor einem unbedachten Ausbau weiterer Mobilfunkinfrastruktur gewarnt werden, da schädliche Auswirkungen auf Insektenpopulationen zu erwarten sind, insbesondere wenn Wechselwirkungen mit anderen Noxen berücksichtigt werden (u.a. Hochspannungsleitungen und künstliche Beleuchtung). Dies könnte zu einem weiteren Rückgang der bereits schwindenden Bestäuberpopulationen führen und würde somit Kosten für die Menschheit mit sich bringen. Es ist auch möglich und bedarf weiterer Klärung (die

durch einige gut geplante Feldstudien erreicht werden könnte), dass einige Insektenpopulationen bereits durch die derzeitige Infrastruktur negativ beeinflusst werden.

Der laufende 5G-Ausbau sollte genau überwacht werden, und toxikologische Tests zur Bewertung schädlicher Auswirkungen sollten sofort beginnen, damit schützende Richtlinien in Kraft treten können. Über experimentelle Ergebnisse sollte transparent berichtet werden, und es sollte die notwendige politische Präsenz gewährleistet sein, um rechtzeitig reagieren zu können. Die wissenschaftliche Diskussion neigt dazu, sich in extreme Positionen zu polarisieren, was selten der Wahrheit entspricht und zu einer erheblichen Verschwendung von Ressourcen führt [160]. Toxische Wirkungen auf Insekten können bei Strahlungswerten auftreten, die für den Menschen unbedenklich sind, insbesondere in den höheren Frequenzbereichen. Wir verweisen auf das so genannte Vorsorgeprinzip, das in Artikel 191 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union festgelegt ist. Der Schutz von Bestäubern erfordert eine stärkere und umfassendere Anwendung des Vorsorgeprinzips, als sie derzeit praktiziert wird [125]. Außerdem impliziert das EU-Vorsorgeprinzip, dass bereits bei Verdacht auf negative Auswirkungen gesetzgeberische Maßnahmen ergriffen werden sollten.

Forschungsethik: Nicht relevant.

Informierte Zustimmung: Nicht relevant.

Beiträge der Autoren: Die Autoren haben die Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Manuskripts übernommen und genehmigten die Einreichung.

Konkurrierende Interessen: Die Autoren geben keinen Interessenkonflikte an.

Finanzierung der Forschung: Der Hauptautor wurde finanziert von der Umwelt- und Verbraucherschutz-Organisation diagnose:funk.

Verfügbarkeit der Daten: Die Rohdaten können auf Anfrage beim korrespondierenden Autor angefordert werden.

Anhang

Berechnungen

Die SI-Einheit zur Angabe der Stärke eines elektromagnetischen Feldes ist Volt pro Meter [V/m], und dies ist auch die übliche Maßeinheit für elektrische Felder. Sie kann verwendet werden zur Berechnung der durchschnittlichen (RMS) Leistungsdichte oder Strahlungsintensität in Watt pro Quadratmeter [W/m^2] von elektromagnetischen Feldern, welche auch in der Solarzellentechnik verwendet wird (Energie pro Flächeneinheit). Für alle Hochfrequenzstudien wurden alle angegebenen Werte der Feldstärke in V/m umgerechnet, wenn sie in einer anderen Einheit angegeben waren. Dazu wurden folgende Formeln verwendet [18, 162]:

$$S = E^2 / Z_0 \quad \text{oder auch} \quad E = \sqrt{S \cdot Z_0}$$

wobei E die elektrische Feldstärke [V/m] ist, S die Leistungsdichte [W/m^2], Z_0 die Wellenimpedanz [377 Ohm].

Bei elektromagnetischen Wellen ist die elektrische Feldstärke mit der magnetischen Feldstärke verknüpft, und zwar gemäß: $B=E/c$, wobei B das Magnetfeld [Tesla] ist, E das elektrische

Feld [V/m] und c die Lichtgeschwindigkeit (3×10^8 m/s) (abgeleitet aus dem Ampère-Faraday-Gesetz oder direkt vom Poynting-Vektor [162]).

Im Nahfeld, d. h. unterhalb einer Wellenlänge (z. B. 30 cm für GSM900), liegen die elektrischen und magnetischen Felder als Wirbelfeld vor. Über viele Messungen gemittelt, bleibt die Proportionalität der elektrischen und magnetischen Feldstärke auch hier erhalten.

Der SAR-Wert (Abkürzung für "Spezifische Absorptionsrate") drückt aus wie viel Energie tatsächlich vom bestrahlten Gewebe absorbiert wird, hängt also vom Gewebetyp (oder allgemein vom Material) ab und wurde hier geschätzt [100–102].

Referenzen

- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*. 2011 Feb;120(3):321–6.
- Rodger JG, Bennett JM, Razanajatovo M, Knight TM, Kleunen M van, Ashman TL, et al. Widespread vulnerability of flowering plant seed production to pollinator declines. *Science Advances*. 2021 Oct;7(42):eabd3524.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2006 Oct;274(1608):303–13.
- Schowalter TD, Noriega JA, Tscharrntke T. Insect effects on ecosystem services—introduction. *Basic and Applied Ecology*. 2018 Feb;26:1–7.
- Sluijs JP van der. Insect decline, an emerging global environmental risk. *Curr Opin Sust*. 2020 Oct;46:39–42.
- Kehoe R, Frago E, Sanders D. Cascading extinctions as a hidden driver of insect decline. *Ecol Entomol*. 2020 Nov;46(4):743–56.
- Smith MR, Singh GM, Mozaffarian D, Myers SS. Effects of decreases of animal pollinators on human nutrition and global health: A modelling analysis. *The Lancet*. 2015 Nov;386(10007):1964–72.
- Smith MR, Mueller ND, Springmann M, Sulser TB, Garibaldi LA, Gerber J, et al. Pollinator deficits, food consumption, and consequences for human health: A modeling study. *Environmental Health Perspectives*. 2022 Dec;130(12):127003.
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS One*. 2017;12:0185809.
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol Conserv*. 2019 Apr;232:8–27.
- Sánchez-Bayo F. Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics*. 2021 Jul;9(8):177.
- Cardoso P, Barton PS, Birkhofer K, Chichorro F, Deacon C, Fartmann T, et al. Scientists warning to humanity on insect extinctions. *Biological Conservation*. 2020 Feb;242:108426.
- Sharma A, Kaur M, Katnoria JK, Nagpal AK. Heavy metal pollution: A global pollutant of rising concern: A global pollutant of rising concern. In: *Toxicity and waste management using bioremediation*. Hershey: IGI Global; 2016. p. 1–26.
- Rhind SM. Anthropogenic pollutants: A threat to ecosystem sustainability? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009;364(1534):3391–401.
- Bandara P, Carpenter DO. Planetary electromagnetic pollution: It is time to assess its impact. *The Lancet Planetary Health*. 2018 Dec;2(12):e512–4.
- Siviter H, Bailes EJ, Martin CD, Oliver TR, Koricheva J, Leadbeater E, et al. Agrochemicals interact synergistically to increase bee mortality. *Nature*. 2021 Aug;596(7872):389–92.
- Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021 Mar;372.
- Feynman C, Leighton RB, Sands M, Gottlieb MA, Pfeiffer R. The feynman lectures on physics, volume II [Internet]. Addison-Wesley Boston, MA, USA; 1965. Available from: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Polarization: A key difference between man-made and natural electromagnetic fields, in regard to biological activity. *Scientific reports* [Internet]. 2015;5:14914. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep14914>
- International Telecommunication Union. Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications [Internet]. Recommendation ITU/RV. 2015. p. 431–8. Available from: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-!PDF-E.pdf
- Chou CK, Guy AW, Galambos R. Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1982;71(6):1321–34.
- Belyaev I. Biophysical mechanisms for nonthermal microwave effects. In: Markov MS, editor. *Electromagnetic Fields in Biology and Medicine*. Boca Raton: CRC Press; 2015. p. 66–85.
- Popov T, Szyszka P. Alpha oscillations govern interhemispheric spike timing coordination in the honey bee brain. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2020 Feb;287(1921):20200115.
- Gupta N, Singh SS, Stopfer M. Oscillatory integration windows in neurons. *Nature Communications*. 2016 Dec;7(1):13808.
- van Swinderen B, Greenspan RJ. Saliency modulates 20–30 hz brain activity in drosophila. *Nature Neuroscience*. 2003 Apr;6(6):579–86.
- Hinrikus H, Bachmann M, Lass J, Tomson R, Tuulik V. Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms. *Int J Radiat Biol*. 2008;84(1):69–79.
- Mohammed HS, Fahmy HM, Radwan NM, Elsayed AA. Non-thermal continuous and modulated electromagnetic radiation fields effects on sleep EEG of rats. *Journal of advanced research* [Internet]. 2013;4(2):181–7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123212000343#f0020>
- Agnati LF, Marcoli M, Maura G, Woods A, Guidolin D. The brain as a "hyper-network": The key role of neural networks as main producers of the integrated brain actions especially via the "broadcasted" neuroconnectomics. *J Neural Transm*. 2018 Feb;125(6):883–97.
- Martinez-Banaclocha M. Astroglial isopotentiality and calcium-associated biomagnetic field effects on cortical neuronal coupling. *Cells* [Internet]. 2020 Feb;9(2):439. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4409/9/2/439/pdf>
- Chiang CC, Shivacharan RS, Wei X, Gonzalez-Reyes LE, Durand DM. Slow periodic activity in the longitudinal hippocampal slice can self-propagate non-synaptically by a mechanism consistent with ephaptic coupling. *J Physiol*. 2018 Nov;597(1):249–69.
- Hales CG, Pockett S. The relationship between local field potentials (LFPs) and the electromagnetic fields that give rise to them. *Frontiers in systems neuroscience*. 2014;8:233.
- Weinberg SH. Ephaptic coupling rescues conduction failure in weakly coupled cardiac tissue with voltage-gated gap junctions. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2017 Sep;27(9):093908.
- Han KS, Guo C, Chen CH, Witter L, Osorno T, Regehr WG. Ephaptic coupling promotes synchronous firing of cerebellar Purkinje cells. *Neuron*. 2018 Nov;100(3):564–78.
- Zhang Y, Tsang TK, Bushong EA, Chu LA, Chiang AS, Ellisman MH, et al. Asymmetric ephaptic inhibition between compartmentalized olfactory receptor neurons. *Nature communications* [Internet]. 2019;10(1):1–16. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-09346-z>
- Bokil H, Laaris N, Blinder K, Ennis M, Keller A. Ephaptic interactions in the mammalian olfactory system. *J Neurosci*. 2001 Oct;21(20):173–3.
- Fogle KJ, Baik LS, Houli JH, Tran TT, Roberts L, Dahm NA, et al.

- Cryptochrome-mediated phototransduction by modulation of the potassium ion channel beta subunit redox sensor. *Proc Natl Acad Sci*. 2015 Feb;112(7):2245–50.
37. Zheng Y, Xia P, Dong L, Tian L, Xiong C. Effects of modulation on sodium and potassium channel currents by extremely low frequency electromagnetic fields stimulation on hippocampal CA1 pyramidal cells. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2021 Feb;40(2):274–85.
 38. Cecchetto C, Maschietto M, Boccaccio P, Vassanelli S. Electromagnetic field affects the voltage-dependent potassium channel kv1.3. *Electromagn Biol Med*. 2020 Aug;39(4):316–22.
 39. Sun Z, Ge J, Guo B, Guo J, Hao M, Wu Y, et al. Extremely low frequency electromagnetic fields facilitate vesicle endocytosis by increasing presynaptic calcium channel expression at a central synapse. *Scientific reports* [Internet]. 2016;6(1):21774. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep21774>
 40. Pilla AA. Electromagnetic fields instantaneously modulate nitric oxide signaling in challenged biological systems. *Biochemical and biophysical research communications*. 2012;426(3):330–3.
 41. Kim JH, Lee JK, Kim HG, Kim KB, Kim HR. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. *Biomolecules & therapeutics*. 2019;27(3):265.
 42. Atlas D. The voltage-gated calcium channel functions as the molecular switch of synaptic transmission. *Annual review of biochemistry*. 2013;82:607–35.
 43. Valko M, Leibfritz D, Moncol J, Cronin MTD, Mazur M, Telser J. Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The international journal of biochemistry & cell biology*. 2007;39(1):44–84.
 44. Saliev T, Begimbetova D, Masoud AR, Matkarimov B. Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Prog Biophys Mol Biol*. 2019 Jan;141:25–36.
 45. Krylov VV. Biological effects related to geomagnetic activity and possible mechanisms. *Bioelectromagnetics*. 2017 Jun;38(7):497–510.
 46. Tonelli BA, Youngflesh C, Tingley MW. Geomagnetic disturbance associated with increased vagrancy in migratory landbirds. *Scientific Reports*. 2023 Jan;13(1):414.
 47. Ferrari TE, Tautz J. Severe honey bee (*Apis mellifera*) losses correlate with geomagnetic and proton disturbances in Earth's atmosphere. *Journal of Astrobiology & Outreach*. 2015;03(03):1–6.
 48. Price C. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere* [Internet]. 2016;7(9):116. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/9/116/pdf>
 49. Price C, Williams E, Elhalel G, Sentman D. Natural ELF fields in the atmosphere and in living organisms. *Int J Biometeorol*. 2020 Feb;65(1):85–92.
 50. Cífra M, Apollonio F, Liberti M, García-Sánchez T, Mir LM. Possible molecular and cellular mechanisms at the basis of atmospheric electromagnetic field bioeffects. *Int J Biometeorol*. 2020 Apr;65(1):59–67.
 51. Elhalel G, Price C, Fixler D, Shainberg A. Cardioprotection from stress conditions by weak magnetic fields in the Schumann resonance band. *Sci Rep*. 2019 Feb;9(1):1645.
 52. Bertagna F, Lewis R, Silva SRP, McFadden J, Jeevaratnam K. Thapsigargin blocks electromagnetic field-elicited intracellular Ca²⁺ increase in HEK 293 cells. *Physiological Reports*. 2022 May;10(9):e15189.
 53. Panagopoulos DJ, Balmori A. On the biophysical mechanism of sensing atmospheric discharges by living organisms. *Sci Total Environ*. 2017;599–600:2026–34.
 54. Panagopoulos DJ, Balmori A, Chrousos GP. On the biophysical mechanism of sensing upcoming earthquakes by animals. *Science of The Total Environment*. 2020 May;717:136989.
 55. Bertagna F, Lewis R, Silva SRP, McFadden J, Jeevaratnam K. Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: A systematic review. *Ann N Y Acad Sci*. 2021 May;1499(1):82–103.
 56. Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarbounis A, Philippetis AL, Margaritis LH. A mechanism for action of oscillating electric fields on cells. *Biochem Biophys Res Commun*. 2000 Jun;272(3):634–40.
 57. Guerra PA, Gegear RJ, Reppert SM. A magnetic compass aids monarch butterfly migration. *Nature communications*. 2014;5(1):1–8.
 58. Gegear RJ, Casselman A, Waddell S, Reppert SM. Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*. *Nature*. 2008;454(7207):1014–8.
 59. de Oliveira JF, Wajnberg E, de Souza Esquivel DM, Weinkauff S, Winklhofer M, Hanzlik M. Antennae: Are they sites for magnetoreception? *J R Soc Interface*. 2010;7(42):143–52.
 60. Lambinet V, Hayden ME, Reid C, Gries G. Honey bees possess a polarity-sensitive magnetoreceptor. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*. 2017;203(12):1029–36.
 61. Vácha M, Půzová T, Kvičalová M. Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach. *J Exp Biol*. 2009 Nov;212(21):3473–7.
 62. Clites BL, Pierce JT. Identifying cellular and molecular mechanisms for magnetosensation. *Annual review of neuroscience*. 2017;40:231–50.
 63. Nordmann GC, Hochstoeger T, Keays DA. Unsolved mysteries: Magnetoreception—a sense without a receptor. *PLoS biology*. 2017;15(10):e2003234.
 64. Ishay JS, Pertsis V, Skutelsky E, Kalicharan D, Want H van der. Ontogenesis of peripheral electromagnetic receptors in hornets. *J Electron Microsc (Tokyo)*. 2004;53(3):281–91.
 65. Kyriacou CP, Rosato E. Genetic analysis of cryptochrome in insect magnetosensitivity. *Front Physiol*. 2022 Aug;13:928416.
 66. Solov'yov I, Schulten K. Cryptochrome and magnetic sensing [Internet]. 2014. Available from: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/cryptochrome/>
 67. Fedele G, Edwards MD, Bhutani S, Hares JM, Murbach M, Green EW, et al. Genetic analysis of circadian responses to low frequency electromagnetic fields in *Drosophila melanogaster*. Taghert PH, editor. *PLoS Genet*. 2014;10(12):e1004804.
 68. Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut LD, Niessner C, et al. Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. Keays D, editor. *PLoS Biol*. 2018;16(10):e2006229.
 69. Netušil R, Tomanová K, Chodáková L, Chvalová D, Doležel D, Ritz T, et al. Cryptochrome-dependent magnetoreception in a heteropteran insect continues even after 24 h in darkness. *J Exp Biol*. 2021;224(19):jeb243000.
 70. Kelleher FC, Rao A, Maguire A. Circadian molecular clocks and cancer. *Cancer Letters*. 2014 Jan;342(1):9–18.
 71. Chun SK, Chung S, Kim HD, Lee JH, Jang J, Kim J, et al. A synthetic cryptochrome inhibitor induces anti-proliferative effects and increases chemosensitivity in human breast cancer cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2015 Nov;467(2):441–6.
 72. Olejárová S, Moravčík R, Herichová I. 2.4 GHz electromagnetic field influences the response of the circadian oscillator in the colorectal cancer cell line DLD1 to miR-34a-mediated regulation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022 Oct;23(21):13210.
 73. Liang CH, Chuang CL, Jiang JA, Yang EC. Magnetic sensing through the abdomen of the honey bee. *Sci Rep*. 2016;6:23657–7.
 74. Shaw J, Boyd A, House M, Woodward R, Mathes F, Cowin G, et al. Magnetic particle-mediated magnetoreception. *J R Soc Interface*. 2015;12(110):20150499.
 75. Hsu CY, Ko FY, Li CW, Fann K, Lue JT. Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*). *PLoS One*. 2007;2(4):e395.
 76. Gao Y, Wen P, Cardé RT, Xu H, Huang Q. In addition to cryptochrome 2, magnetic particles with olfactory co-receptor are important for magnetic orientation in termites. *Commun Biol*. 2021;4(1):1121.
 77. Kong LJ, Crepez H, Gecka A, Urbanek A, Dumke R, Paterek T. In vivo biomagnetic characterisation of the American cockroach. *Scientific reports*. 2018;8(1):5140.
 78. Bazalova O, Kvalcova M, Valkova T, Slaby P, Bartos P, Netusil R, et al. Cryptochrome 2 mediates directional magnetoreception in cockroaches. *PNAS*. 2016;113(6):1660–5.

79. Vacha M, Puzova T, Drstková D. Ablation of antennae does not disrupt magnetoreceptive behavioural reaction of the American cockroach to periodically rotated geomagnetic field. *Neurosci Lett*. 2008;435(2):103–7.
80. Cucurachi S, Tamis WL, Vijver MG, Peijnenburg WJ, Bolte JF, Snoo GR de. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Int*. 2013;51:116–40.
81. Balmori A. Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects. *Sci Total Environ*. 2021 May;767:144913.
82. Carpenter RL, Livstone EM. Evidence for nonthermal effects of microwave radiation: Abnormal development of irradiated insect pupae. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971 Feb;19(2):173–8.
83. Weisbrot D, Lin H, Ye L, Blank M, Goodman R. Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster*. *J Cell Biochem*. 2003;89(1):48–55.
84. Panagopoulos DJ, Karabarounis A, Margaritis LH. Effect of GSM 900 MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster*. *Electromagn Biol Med*. 2004;23(1):29–43.
85. Atli E, Unlü H. The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development of *Drosophila melanogaster*. *Int J Radiat Biol*. 2006;82(6):435–41.
86. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: How species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health*. 2021;
87. Malkemper EP, Tscheulin T, Vanbergen AJ, Vian A, Balian E, Goudeseune L. The impacts of artificial electromagnetic radiation on wildlife (flora and fauna). Current knowledge overview: A background document to the web conference. A report of the EKLIPSE project. [Internet]. Elsevier; 2018. Available from: https://eklipse.eu/wp-content/uploads/2020/10/EMR-KnowledgeOverviewReport_FINAL_27042018-1.pdf
88. Goudeseune L, Balian E, Ventocilla J. The impacts of artificial electromagnetic radiation on wildlife (flora and fauna) [Internet]. 2018. Available from: https://eklipse.eu/wp-content/uploads/2020/10/EMR-WebConferenceReport_FINAL_27042018-1.pdf
89. Vanbergen AJ, Potts SG, Vian A, Malkemper EP, Young J, Tscheulin T. Risk to pollinators from anthropogenic electromagnetic radiation (EMR): Evidence and knowledge gaps. *Sci Total Environ*. 2019;695:133833.
90. Wan GJ, Jiang SL, Zhao ZC, Xu JJ, Tao XR, Sword GA, et al. Bio-effects of near-zero magnetic fields on the growth, development and reproduction of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* and brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *J Insect Physiol*. 2014;68:7–15.
91. Sutton GP, Clarke D, Morley EL, Robert D. Mechanosensory hairs in bumblebees (*Bombus terrestris*) detect weak electric fields. *PNAS* [Internet]. 2016;113(26):7261–5. Available from: <http://www.pnas.org/content/pnas/113/26/7261.full.pdf>
92. Bae JE, Bang S, Min S, Lee SH, Kwon SH, Lee Y, et al. Positive geotactic behaviors induced by geomagnetic field in *Drosophila*. *Mol Brain*. 2016;9(1):55–5.
93. Driessen S. Information platform EMF-Portal of the RWTH Aachen University [Internet]. Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine; 2022. Available from: <https://www.emf-portal.org/en>
94. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*. 2020 May;118(5):483–524.
95. Bordage G, Caellegh AS, Steinecke A, Bland CJ, Crandall SJ, McGaghie WC, et al. Review criteria for research manuscripts. *Academic medicine: journal of the Association of American Medical Colleges*. 2001;76(9):897–978.
96. ORSAA. ORSAA database on electromagnetic bioeffects [Internet]. Oceania Radiofrequency Scientific Advisory Association; 2022. Available from: <https://www.orsaa.org/orsaa-database.html>
97. Friedrich JO, Adhikari NK, Beyene J. The ratio of means method as an alternative to mean differences for analyzing continuous outcome variables in meta-analysis: A simulation study. *BMC Medical Research Methodology*. 2008 May;8(1):1–15.
98. Schwarzer G, Carpenter JR, Rücker G. Meta-analysis with r. Cham: Springer International Publishing; 2015.
99. Röver C, Friede T. Using the bayesmeta r package for bayesian random-effects meta-regression. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2023 Feb;229:107303.
100. Thielens A, Bell D, Mortimore DB, Greco MK, Martens L, Joseph W. Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 ghz. *Scientific reports*. 2018;8(1):3924.
101. Thielens A, Greco MK, Verloock L, Martens L, Joseph W. Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Scientific reports*. 2020;10(1):461.
102. De Borre E, Joseph W, Aminzadeh R, Müller P, Boone MN, Josipovic I, et al. Radio-frequency exposure of the yellow fever mosquito (a. Aegypti) from 2 to 240 GHz. Cai MB, editor. *PLOS Computational Biology*. 2021 Oct;17(10):e1009460.
103. Anglemeyer A, Horvath HT, Bero L. Healthcare outcomes assessed with observational study designs compared with those assessed in randomized trials. *Cochrane Db Syst Rev*. 2014 Apr;2014(4).
104. Balmori A. Evidence for a health risk by RF on humans living around mobile phone base stations: From radiofrequency sickness to cancer. *Environ Res*. 2022 Nov;214:113851.
105. Balmori A. Effects of man-made and especially wireless communication electromagnetic fields on wildlife. In: *Electromagnetic fields of wireless communications: Biological and health effects*. Boca Raton: CRC Press; 2022. p. 393–446.
106. Lazaro A, Chroni A, Tscheulin T, Devalez J, Matsoukas C, Petanidou T. Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators. *J Insect Conserv*. 2016;20(2):315–24.
107. Adelaja OJ, Ande AT, Abdulraheem GD, Oluwakorode IA, Oladiipo OA, Oluwajobi AO. Distribution, diversity and abundance of some insects around a telecommunication mast in Ilorin, Kwara State, Nigeria. *Bulletin of the National Research Centre*. 2021 Dec;45(1):1–7.
108. Nyirenda VR, Namukonde N, Lungu EB, Mulwanda S, Kalezu K, Simwanda M, et al. Effects of phone mast-generated electromagnetic radiation gradient on the distribution of terrestrial birds and insects in a savanna protected area. *Biologia (Bratisl)*. 2022 Jun;77:2237–49.
109. Ozel HB, Cetin M, Sevik H, Varol T, Isik B, Yaman B. The effects of base station as an electromagnetic radiation source on flower and cone yield and germination percentage in *Pinus brutia* ten. *Biologia Futura*. 2021 Apr;72(3):359–65.
110. Ford AT, Ågerstrand M, Brooks BW, Allen J, Bertram MG, Brodin T, et al. The role of behavioral ecotoxicology in environmental protection. *Environmental Science & Technology*. 2021 Apr;55(9):5620–8.
111. Wellenstein G. [The influence of high-voltage power lines on honey bees] Der Einfluss von Hochspannungsleitungen auf Bienenvölker (*Apis mellifica* L.). *J Appl Entomol*. 1973;74(1-4):86–94.
112. Greenberg B, Bindokas VP, Frazier MJ, Gauger JR. Response of honey bees, *Apis mellifera* L., to high-voltage transmission lines. *Environ Entomol*. 1981 Oct;10(5):600–10.
113. Horn H. Bienen im elektrischen Feld. *Apidologie*. 1982;13(1):79–82.
114. Bindokas V, Greenberg B. Biological effects of a 765-kV, 60-Hz transmission line on honey bees (*Apis mellifera* L.): Hemolymph as a possible stress indicator. *Bioelectromagnetics*. 1984;5(3):305–14.
115. Korall H, Leucht T, Martin H. Bursts of magnetic fields induce jumps of misdirection in bees by a mechanism of magnetic resonance. *Journal of Comparative Physiology A*. 1988;162(3):279–84.
116. Dufor T, Grehl S, Tang AD, Doulazmi M, Traoré M, Debray N, et al. Neural circuit repair by low-intensity magnetic stimulation requires cellular magnetoreceptors and specific stimulation patterns. *Sci Adv*. 2019 Oct;5(10):eaav9847.
117. Lohof AM, Dufor T, Sherrard RM. Neural circuit repair by low-intensity rTMS. *The Cerebellum*. 2022 Jan;21(5):750–4.
118. Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic

- fields bioeffects. Cordes N, editor. PLoS ONE. 2013 Jun;8(6):e62663.
119. Barnes F, Greenebaum B. Setting guidelines for electromagnetic exposures and research needs. *Bioelectromagnetics*. 2020 Apr;41(5):392–7.
 120. Mulot M, Kroeber T, Gossner M, Fröhlich J. Wirkung von nicht-ionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) [Internet]. Neuenburg, Switzerland: Bundesamt für Umwelt; 2022. Available from: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/electrosmog/publications-studies/studies.html>
 121. Thielens A. Environmental impact of 5G : A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. Panel for the Future of Science and Technology (STOA) [Internet]. 2021; Available from: <https://data.europa.eu/doi/10.2861/318352>
 122. Halgamuge MN. Review: Weak radiofrequency radiation exposure from mobile phone radiation on plants. *Electromagn Biol Med*. 2016;36(2):213–35.
 123. Waldmann-Selsam C, Puente AB la, Breunig H, Balmori A. Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of The Total Environment*. 2016 Dec;572:554–69.
 124. Miller AB, Sears ME, Morgan LL, Davis DL, Hardell L, Oremus M, et al. Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices. *Front Public Health*. 2019 Aug;7:223.
 125. Drivdal L, Sluijs JP van der. Pollinator conservation requires a stronger and broader application of the precautionary principle. *Curr Opin Insect Sci*. 2021 Aug;46:95–105.
 126. Francis CD, Barber JR. A framework for understanding noise impacts on wildlife: An urgent conservation priority. *Front Ecol Environ*. 2013 Aug;11(6):305–13.
 127. Gaston KJ, Visser ME, Hölker F. The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2015 May;370(1667):20140133.
 128. Kostoff RN, Heroux P, Aschner M, Tsatsakis A. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicol Lett*. 2020 May;323:35–40.
 129. Sutherland WJ, Butchart SHM, Connor B, Culshaw C, Dicks LV, Dinsdale J, et al. A 2018 horizon scan of emerging issues for global conservation and biological diversity. *Trends Ecol Evol*. 2018;33(1):47–58.
 130. Coronado LM, Stoute JA, Nadovich CT, Cheng J, Correa R, Chaw K, et al. Microwaves can kill malaria parasites non-thermally. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2023 Feb;13:67.
 131. Markov MS. Expanding use of pulsed electromagnetic field therapies. *Electromagnetic biology and medicine*. 2007 Jan;26(3):257–74.
 132. Pilla AA. Nonthermal electromagnetic fields: From first messenger to therapeutic applications. *Electromagnetic biology and medicine*. 2013;32(2):123–36.
 133. Costantini E, Aielli L, Serra F, Dominicis LD, Falasca K, Giovanni PD, et al. Evaluation of cell migration and cytokines expression changes under the radiofrequency electromagnetic field on wound healing in vitro model. *Int J Mol Sci*. 2022 Feb;23(4):2205.
 134. Hug K, Röösl M. Therapeutic effects of whole-body devices applying pulsed electromagnetic fields (PEMF): A systematic literature review. *Bioelectromagnetics*. 2011 Sep;33(2):95–105.
 135. Gaynor JS, Hagberg S, Gurfein BT. Veterinary applications of pulsed electromagnetic field therapy. *Res Vet Sci*. 2018 Aug;119:1–8.
 136. Mattsson MO, Simkó M. Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 hz to 10 thz. *Medical Devices: Evidence and Research*. 2019 Sep;Volume 12:347–68.
 137. Mert T, Yaman S. Pro-inflammatory or anti-inflammatory effects of pulsed magnetic field treatments in rats with experimental acute inflammation. *Environ Sci Pollut Res*. 2020 Jun;27(25):31543–54.
 138. Lai H. Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on spatial learning in the rat. *Physiology & behavior*. 2004;82(5):785–9.
 139. Panagopoulos D, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos G. Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (review). *Int J Oncol*. 2021 Oct;59(5):1–16.
 140. Bartos P, Netušil R, Slaby P, Doležel D, Ritz T, Vacha M. Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock. *J R Soc Interface*. 2019;16(158):20190285.
 141. Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*. 2004;429(6988):177.
 142. Warnke U. Die Auswirkungen elektromagnetischer Wellen auf Tiere [Internet]. Saarbrücken: Internetpublikation der Kompetenzinitiative e.V.; 2009. Available from: <https://kompetenzinitiative.com/die-auswirkungen-elektromagnetischer-felder-auf-tiere/>
 143. Lupi D, Mesiano MP, Adani A, Benocci R, Giacchini R, Parenti P, et al. Combined effects of pesticides and electromagnetic-fields on honeybees: Multi-stress exposure. *Insects* [Internet]. 2021;12(8):716. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4450/12/8/716/pdf>
 144. Shepherd S, Jackson CW, Sharkh SM, Aonuma H, Oliveira EE, Newland PL. Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Entrain Locust Wingbeats. *Bioelectromagnetics*. 2021;42(4):296–308.
 145. Cappucci U, Casale AM, Proietti M, Marinelli F, Giuliani L, Piacentini L. WiFi related radiofrequency electromagnetic fields promote transposable element dysregulation and genomic instability in *Drosophila melanogaster*. *Cells*. 2022 Dec;11(24):4036.
 146. Gee D. Late lessons from early warnings: Towards realism and precaution with EMF? *Pathophysiology*. 2009 Aug;16(2-3):217–31.
 147. European Environment Agency. Late lessons from early warnings: Science, precaution, innovation - summary. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2016.
 148. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. The identification of an intensity 'window' on the bioeffects of mobile telephony radiation. *Int J Radiat Biol*. 2010;86(5):358–66.
 149. Margaritis LH, Manta AK, Kokkaliaris KD, Schiza D, Alimisis K, Barkas G, et al. *Drosophila* oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources. *Electromagn Biol Med*. 2013 Aug;33(3):165–89.
 150. Geronikolou S, Zimeras S, Davos CH, Michalopoulos I, Tsitomeneas S. Diverse radiofrequency sensitivity and radiofrequency effects of mobile or cordless phone near fields exposure in *Drosophila melanogaster*. *PLoS One*. 2014;9(11):e112139.
 151. Kapetanakis TN, Ioannidou MP, Baklezos AT, Nikolopoulos CD, Sergaki ES, Konstantaras AJ, et al. Assessment of radiofrequency exposure in the vicinity of school environments in Crete island, South Greece. *Applied Sciences*. 2022 May;12(9):4701.
 152. Karastergios I, Gialofas A, Karabetos E. National observatory of electromagnetic fields: National telemetric network for the measurement of high-frequency electromagnetic fields in Greece. *Radiat Prot Dosim*. 2020 Feb;188(4):413–23.
 153. Ofcom. 5G exposure measurements [Internet]. 2020. Available from: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0015/190005/emf-test-summary.pdf
 154. ANFR. 5G exposure measurements [Internet]. 2021. Available from: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/20211214-exposition-5G.pdf>
 155. funkstrahlung.ch. Grenzwerte [Internet]. 2017. Available from: <https://www.funkstrahlung.ch/index.php/politik/grenzwerte>
 156. International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic Fields (ICBE-EMF). Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: Implications for 5G. *Environ Health*. 2022 Oct;21(1):92.
 157. Levitt BB, Lai HC, Manville AM. Low-level EMF effects on wildlife and plants: What research tells us about an ecosystem approach. *Frontiers in Public Health*. 2022 Nov;10:4654.

158. Scheffer M, Bolhuis JE, Borsboom D, Buchman TG, Gijzel SMW, Goulson D, et al. Quantifying resilience of humans and other animals. *Proc Natl Acad Sci*. 2018 Oct;115(47):11883–90.
159. Mostafalou S, Abdollahi M. Pesticides: An update of human exposure and toxicity. *Arch Toxicol*. 2016 Oct;91(2):549–99.
160. Chartres N, Sass JB, Gee D, Bălan SA, Birnbaum L, Coglianò VJ, et al. Conducting evaluations of evidence that are transparent, timely and can lead to health-protective actions. *Environmental Health*. 2022 Dec;21(1):123.
161. Chiaraviglio L, Cacciapuoti AS, Di Martino G, Fiore M, Montesano M, Trucchi D, et al. Planning 5G networks under emf constraints: State of the art and vision. *IEEE Access*. 2018;6:51021–37.
162. tutorialspoint.com. Poynting-vector [Internet]. 2021. Available from: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_poynting_vector.htm

Ergänzendes Material: Dieser Artikel enthält ergänzendes Material (<https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0072>).

Übersetzung: Diagnose Funk e. V. Es gilt der englische Originaltext.