

Review

Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Insekten

Alain Thill

Zusammenfassung

Weltweit nehmen die Insekten mit alarmierender Geschwindigkeit ab. Es ist bekannt, dass hierbei, neben anderen Ursachen, insbesondere die Verwendung von Pestiziden und die moderne landwirtschaftliche Praxis eine große Rolle spielen. Die kumulativen Auswirkungen multipler niedrig dosierter Toxine und die Ausbreitung von Giftstoffen in der Natur sind noch nicht methodisch erforscht, oder erst in den Anfängen.

Bestehende Forschung deutet auf einen weiteren Faktor anthropogenen Ursprungs hin, welcher subtile schädliche Auswirkungen haben könnte: die zunehmend häufigere Verwendung von technisch erzeugten elektromagnetischen Feldern (EMF) wie Hochspannung, Mobilfunk und WLAN. Die Infrastruktur der nächsten Generation der Mobilfunktechnologien (5G) wird aktuell aufgebaut, ohne vorher auf mögliche toxische Auswirkungen geprüft worden zu sein. Mit dem Streben der Menschheit nach Allgegenwart der Technologie könnten selbst bescheidene Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Organismen irgendwann ein Sättigungsniveau erreichen, das nicht mehr ignoriert werden kann.

Dieses systematische Review wertet die Studienlage zu den toxischen Wirkungen elektromagnetischer Felder (EMF) auf Insekten aus. Ebenfalls enthalten ist eine allgemeine Übersicht über berichtete Effekte und Mechanismen der Einwirkung von EMF, die auf neue Erkenntnisse der Zellbiologie eingeht. 72 der 83 analysierten Studien fanden einen Effekt. Als negative Wirkungen wurden in Studien beschrieben: Einschränkungen des Orientierungssinns, reduzierte Fortpflanzungsfähigkeit und Fruchtbarkeit, Lethargie, Veränderungen der Flugdynamik, Misserfolg in der Nahrungssuche, reduzierte Reaktionsgeschwindigkeiten, Fluchtverhalten, Störung der circadianen Rhythmik, Blockierung der Atmungskette und Schädigung der Mitochondrien, Fehlaktivierungen im Immunsystem, erhöhte Anzahl von DNA-Strangbrüchen.

Einige Wirkmechanismen, die zu diesen Schädigungen führen, werden identifiziert. EMF beeinträchtigen den Stoffwechsel, u. a. wirken sie auf spannungsgesteuerte Calciumkanäle, z.B. in der neuronalen Erregungsübertragung und im Muskelgewebe, was zu einer Überaktivierung der Signaltransduktion und Atmungskette mit Produktion von freien Sauerstoffradikalen und in der Folge zu oxidativem Zellstress führen kann.

Im Ergebnis zeigt sich, dass EMF einen ernstzunehmenden Einfluss auf die Vitalität von Insektenpopulationen haben könnten. Festgestellt wurde in einigen Experimenten, dass trotz geringen Belastungen durch Sendeanlagen nach mehreren Monaten schädliche Auswirkungen eintraten. Feldstärken bereits 100-fach unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte könnten schon Auswirkungen haben. Vor dem Hintergrund des rapiden Rückgangs der Insekten und des weiteren Ausbaus hochfrequenter elektromagnetischer Feldquellen besteht nicht nur weiterer, dringender Forschungsbedarf, insbesondere auch für die Wechselwirkungen mit anderen schädigenden Noxen wie Pestiziden. Bei der Planung des Mobilfunkausbaus müssen jetzt schon Lebensräume der Insekten vor EMF-Belastung geschützt werden.



1.	Biologische Wirkung von elektromagnetischen Feldern (EMF)	3
1.1	Magnetsinn	5
1.2	Cryptochrom	5
1.3	Magnetit	7
2.	Übersicht der Forschungslage zum Thema.	7
2.1	Vorangegangene Reviews	7
2.1.1	Cucurachis Review	7
2.1.2	Balmoris Review	7
2.1.3	Friesens Bericht	7
2.1.4	Redlarskis Review	7
2.1.5	Eklipse-Report	7
2.1.6	Vanbergen u. a. Review	7
2.2	Weitere Vorgehensweise	7
3.	Kommentierte Auflistung einzelner Studien	10
3.1	Niederfrequente elektromagnetische Felder („low frequency“, LF-EMF)	10
3.1.1	Shepherd 2018, 2019	11
3.1.2	Erdoğan 2019	11
3.1.3	Todorović 2019	11
3.1.4	Maliszewska 2018	11
3.1.5	Wyszkowska 2016	11
3.1.6	Zhang 2016	11
3.2	Hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF): Rezente Studien	11
3.2.1	Panagopoulos 2019, [...] 2006	11
3.2.2	Manta 2017, 2014	12
3.2.3	Singh 2020	12
3.2.4	Lopatina 2019	12
3.2.5	Odemer 2019	13
3.2.6	Vilić 2017	13
3.2.7	Taye 2017	13
3.2.8	Favre 2017, 2011	13
3.3	Hochfrequente elektromagnetische Felder: Ältere Studien	13
3.3.1	Lázaro 2016	13
3.3.2	Geronikolou 2014	13
3.3.3	Chavdoula 2010	13
3.3.4	Cammaerts 2014, 2013, 2012	14
3.3.5	Kumar 2011–2013	14
3.3.6	Stever & Kuhn 2006, 2005	14
3.4	„No-effect“-Studien	14
3.4.1	Miyay 2014	14
3.4.2	Hoofwijk 2013	14
4.	Bilanz der Forschungslage und des Wissensstandes Anfang 2020.	14
5.	Appendix	17
5.1	Liste der Abkürzungen	17
5.2	Berechnungen	17
	Literatur	18
	Tabellen	21

1. Biologische Wirkung von elektromagnetischen Feldern (EMF)

Das seit Kurzem öffentlich bekannt gewordene Insektensterben, dessen Anfänge schon mehrere Jahrzehnte zurückliegen, scheint durch eine Vielzahl von Faktoren mit kumulativen Wirkungen bedingt zu sein (Hallmann u. a. 2017; Sánchez-Bayo und Wyckhuys 2019, Abb. 1). Obschon man annimmt, dass die Hauptursachen in der Verwendung von Pestiziden sowie in der Umstrukturierung oder Zerstörung natürlicher Lebensräume zu sehen sind, können zusätzliche negative Effekte anderer Art nicht ausgeschlossen werden – so z. B. die Wirkung von hormonähnlichen Stoffen, Schwermetallen und elektromagnetischen Feldern, alles Faktoren, deren Vorkommen in der Natur in den letzten Jahrzehnten drastisch angestiegen ist (Sharma u. a. 2016; Rhind 2009; Bandara und Carpenter 2018).

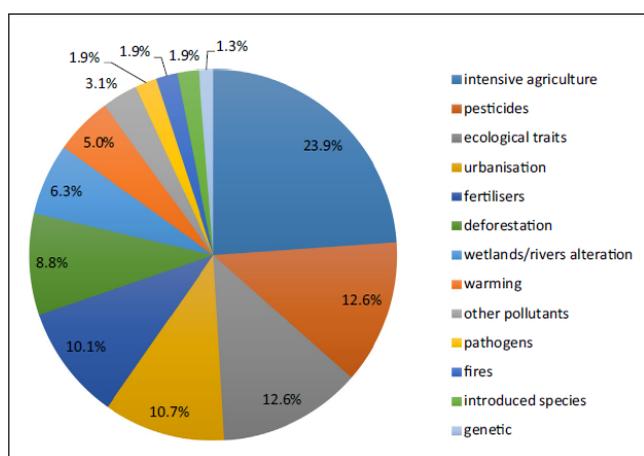


Abb. 1: Hauptursachen des rezenten Insektensterbens.
Quelle: Sánchez-Bayo und Wyckhuys 2019

Dieses Review befasst sich mit den Auswirkungen niederfrequenter und hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Insekten. Die Auswirkungen der niederfrequenten Magnetfelder (und EMF) von Hochspannungsleitungen (50 Hz Netzfrequenz) sind schon relativ gut erforscht, z. B. was die Inzidenz von Leukämie beim Menschen betrifft (ARIMMORA final report 2015) oder auch die Schädlichkeit für Insekten (Wyszkowska u. a. 2016; Maliszewska u. a. 2018; Shepherd u. a. 2018). Hochspannung und Netzstrom sind ab 1950 in Europa Standard geworden. Weniger gut erforscht sind die neueren, hochfrequenten elektromagnetischen Felder (HF-EMF) im Bereich der Mikrowellen, wie sie für das Mobilfunknetzwerk, aber auch WLAN und ähnliche Anwendungen genutzt werden (ab 1990). Im Falle von niederfrequenten EMF existieren seit Jahrzehnten adäquate experimentelle Vorrichtungen, sogenannte Helmholtz-Spulen, um die charakteristischen EMF im Labor auf Organismen anzuwenden. Hierbei kann auch die Feldstärke eingestellt werden. Im Vergleich hierzu existieren für hochfrequente EMF, wie sie z. B. von Handymasten oder WLAN-Routern ausgehen, keine adäquaten Emulationen – oder diese sind sehr kostspielig und/oder bedürfen einer Genehmigung (Mobilfunk-Repeater). Am wirklichkeitsnächsten ist es momentan, für Laborversuche Handys als Emulation von Handymasten zu verwenden und eigentliche WLAN-Router.

Da wir kurz vor dem Ausbau der nächsten Mobilfunk-Generation (5G) stehen, deren Infrastruktur eine nochmalige Erhöhung der abgestrahlten Energie im städtischen Sektor beinhalten könnte, sollte – wie dies z. B. beim Vermarkten neuer Arzneimittel unablässig ist – im Vorfeld die Unbedenklichkeit dieser Technologie aufgezeigt werden (Bandara und Carpenter 2018).

Allgemein unterscheidet man zwischen thermischen und nicht-thermischen biologischen Effekten elektromagnetischer Felder. Der thermische Effekt basiert auf direkter Erhitzung des Gewebes (wie im Mikrowellenherd). Unterhalb der Intensitäten, wo Gewebeerhitzung messbar ist, wurden zusätzlich mehrere nicht-thermische Effekte beschrieben, z. B. das Mikrowellenhören (beim Menschen), auch bekannt als Frey-Effekt, dessen Mechanismus seit einigen Jahrzehnten bekannt ist (elektroelastische Transformation von Mikrowellen in Schallwellen im Schädel, siehe Chou, Guy und Galambos 1982; Belyaev und Markov 2015). Als wissenschaftlich gesichert gilt auch die sogenannte parametrische Resonanz, die mit einer Veränderung des menschlichen und tierischen Elektroenzephalogramms einhergeht (Hinrikus u. a. 2017; Mohammed u. a. 2013). Obschon noch nicht abschließend geklärt, häufen sich die Hinweise darauf, dass die parametrische Resonanz ein Nebenprodukt der Aktivierung spannungsgesteuerter Ionenkanäle ist und mit Calcium-Freisetzung in Verbindung steht (Agnati u. a. 2018; Pall 2016; Sun u. a. 2016; Belyaev und Markov 2015) – und somit alle tierischen und pflanzlichen Organismen betrifft.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die biologischen Auswirkungen chronischer EMF-Exposition ungefähr folgendermaßen ablaufen: EMF wirken (direkt oder indirekt) auf spannungsgesteuerte Calciumkanäle (VGCC, voltage-gated calcium channel) und führen zu deren Öffnung und einer erhöhten Freisetzung von Calcium.

Spannungsgesteuerte Ionenkanäle (Na^+ , K^+) sowie der NMDA-Rezeptor scheinen empfindlich für nicht-thermische (d. h. sehr niedrige) EMF-Stärken zu sein und dies hängt vermutlich zusammen mit nützlichen Funktionen der Wahrnehmung körpereigener EMF („ephaptische Kopplung“), die durch die Aktivität der Neuronen und Astrozyten entstehen (Martinez-Banaclocha 2020; Chiang u. a. 2019; Hales und Pockett 2014). So scheint der Mechanismus der ephaptischen Kopplung im Gleichschwingen der Herzzellen (Weinberg 2017) sowie bei der Verarbeitung von Duftstoffgemischen (Antennen oder Riechnerv) (Zhang u. a. 2019; Bokil u. a. 2001) und auch bei der Bewegungskoordination im Kleinhirn (Han u. a. 2018) eine aktive Rolle zu spielen. In diesen Fällen haben sich jedoch spannungsgesteuerte Natriumkanäle (Weinberg 2017; Han u. a. 2018), Kaliumkanäle (Fogle u. a. 2015) oder NMDA-Rezeptoren (Chiang u. a. 2019) – welche spannungsensibel sind und Natrium und Calcium schleusen – als die direkt durch EMF beeinflussten Makromoleküle herausgestellt. Zusätzlich wird vermutet, dass astrocytäre Calciumwellen durch ephaptische Kopplung die neuronale Aktivität großflächig und weitreichend beeinflussen und regulieren (Agnati u. a. 2018; Martinez-Banaclocha 2020).

Die EMF-bedingte Aktivierung spannungsgesteuerter Natrium- und Kaliumkanäle oder NMDA-Rezeptoren führt indirekt, durch Auslösen oder Verstärken von Aktionspotenzialen, zu einer erhöhten Aktivierung der synaptischen VGCC und Freisetzung von Calcium (Pilla 2012); Neurotransmission anhand von Aktionspotenzialen über chemische Synapsen benötigt eine Aktivierung der VGCC (Atlas 2013).

Calcium ist einer der geläufigsten sekundären Botenstoffe in allen Organismen, erhöhte Calciumpegel wirken aktivierend z.B. auf Atmungskette und Muskel (Kim u. a. 2019). Calcium setzt wiederum via Calmodulin Stickoxid (NO) frei. Eine Überaktivierung der calciumabhängigen Neurotransmission (und gegebenenfalls Stoffwechselwege) führt zur Produktion von freien Sauerstoffradikalen (reactive oxygen species, ROS) wie Peroxynitrit, also zu oxidativem Stress.

Chronisch erhöhter oxidativer Stress wirkt auf vielfältige Weise toxisch auf Organismen, z.B. durch Blockierung der Atmungskette, Schädigung der Mitochondrien, Fehlaktivierung des Immunsystems sowie Erhöhung der Erbgut-Mutationsrate (Valko u. a. 2007; Saliev u. a. 2019).

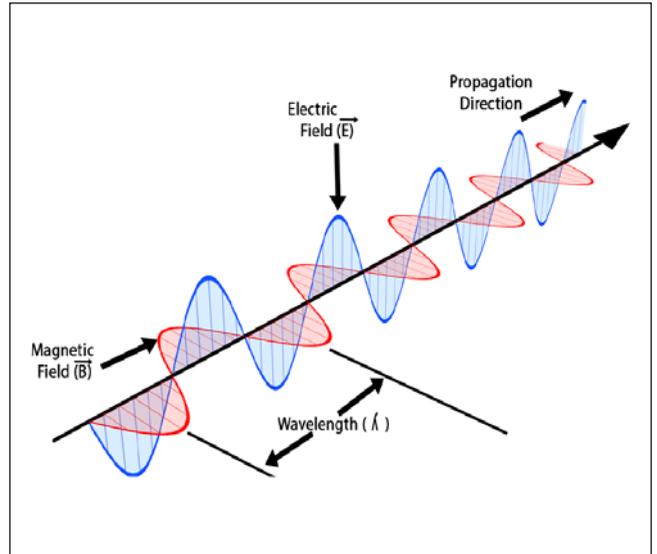


Abb. 3: Elektromagnetische Welle. Elektrische Feldstärke in blau, magnetische in rot. Aus beiden Feldstärken kann die Strahlungsintensität oder auch Leistungsdichte eines EMF abgeleitet werden (siehe Anhang). Quelle: <https://byjus.com/physics/characteristics-of-em-waves/>

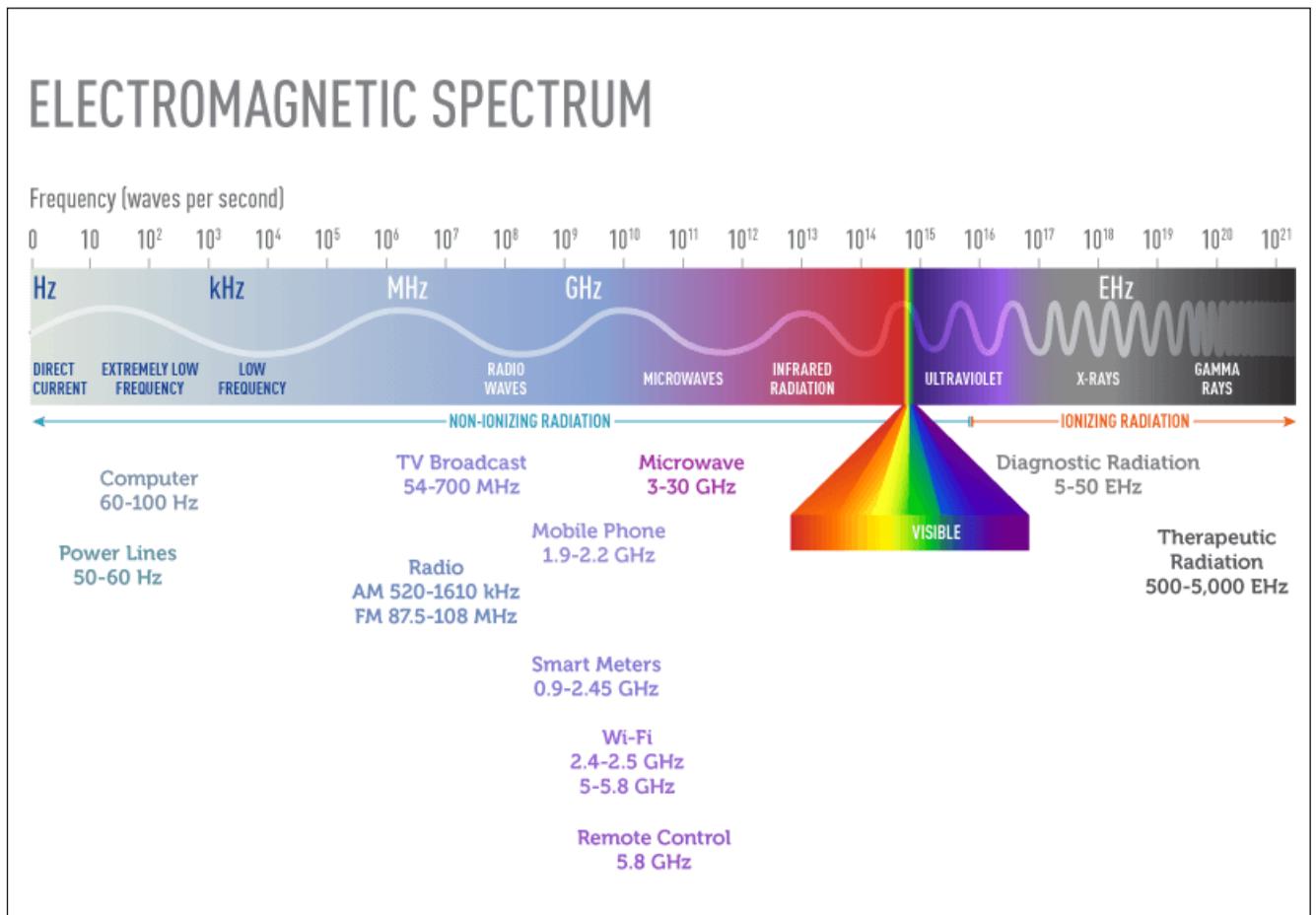


Abb. 2: Elektromagnetisches Spektrum. Quelle: <https://thinktankgreen.com/emf-testing/facts-education/electromagnetic-spectrum/>

1.1 Magnetsinn

Natürliche Schwankungen des Erdmagnetfeldes („geomagnetic field“, GMF) z. B. aufgrund von Sonneneruptionen, bewirken nachweislich bei Tieren Stress. So ist der Effekt sehr gut durch die Forschergruppe um Krylov bei Fischen und Daphnien belegt (Krylov 2017). Auch bei Bienen wurde eine starke Korrelation festgestellt (Ferrari und Tautz 2015).

Guijun Wan u. a. 2019 haben den experimentellen Beweis erbracht, dass in Abwesenheit des natürlichen Erdmagnetfeldes das Fressverhalten und die Entwicklung von Heuschrecken gestört ist. Zitat: „Diese Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass starke Veränderungen der GMF-Intensität das Fressverhalten der Insekten und die zugrunde liegenden Regulierungsprozesse beeinflussen können. Unsere Ergebnisse liefern weitere Beweise dafür, dass die Magnetorezeption und die regulatorischen Reaktionen auf Veränderungen des GMF eine Vielzahl von biologischen Prozessen beeinflussen können.“

Die Existenz eines Magnetsinnes ist in den meisten Insektenordnungen beschrieben: so etwa bei Schmetterlingen, Käfern, Fliegen, Ameisen und Bienen (Hymenoptera) sowie

Termiten und Schaben (Guerra, Gegear und Reppert 2014; Gegear u. a. 2008; Oliveira u. a. 2010; Lambinet u. a. 2017; Vacha, Puzova und Kvicalova 2009).

Die Frage des Magnetsinnes ist jedoch recht komplex und im Detail noch nicht abschließend geklärt, da verschiedene Organismen verschiedene Mechanismen nutzen (Clites und Pierce 2017; Nordmann, Hochstoeger und Keays 2017). Auf molekularer Ebene wurden zwei typische, aber unterschiedliche Magnetorezeptionssysteme entdeckt: Cryptochrom und Magnetit.

1.2 Cryptochrom

Cryptochrom (CRY) ist ein Molekül aus der Familie der Blaulicht-Rezeptoren, das in Insekten die circadiane Rhythmik reguliert. Zusätzlich ist Cryptochrom, sobald es durch energiereiches Licht (über den Radikalpaar-Mechanismus) aktiviert wurde, magnetosensibel (Georgiou 2010). CRY kommt sowohl im Auge der meisten Insekten und Wirbeltiere wie auch in deren Gehirn vor (d. i. ventro-lateral-Neuronen der Insekten oder im suprachiasmatischen Nucleus – SCN der Wirbeltiere), wo es Teil der circadianen Rhythmik ist (molekulare Uhr, d. h. Zeitgeber, siehe Solov'yov und Schulten 2014).

Fedele u. a. 2014 zeigten anhand von Cryptochrom-Mutanten *Drosophila*, dass Cryptochrom notwendig ist für licht- und EMF-bewirkte Verzögerung der circadianen Rhythmik und dass diese Effekte tatsächlich im Gehirn von *Drosophila*, jedoch nicht im SCN von Mäusen, stattfinden.

Desweiteren konnten sie zeigen, dass der eigentliche Magnetorezeptor nicht Cryptochrom selbst sein muss. Qin u. a. 2016 haben gezeigt, dass Cryptochrom mit dem Protein CG8198 (MagR – der putative Magnetorezeptor) assoziiert ist, die beide im Auge lokalisiert sind.

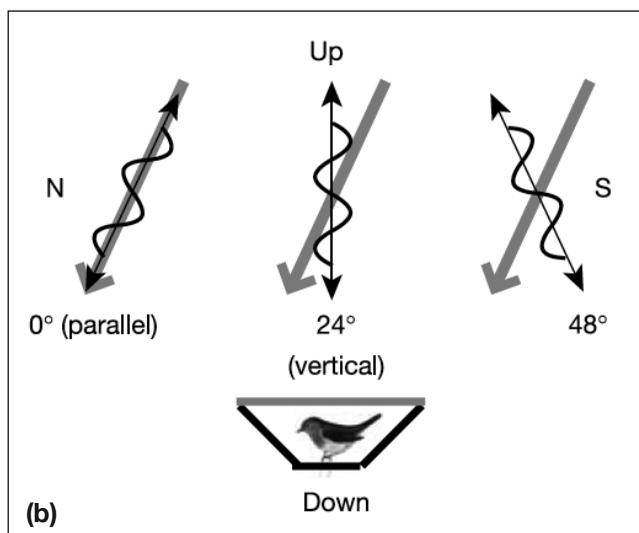
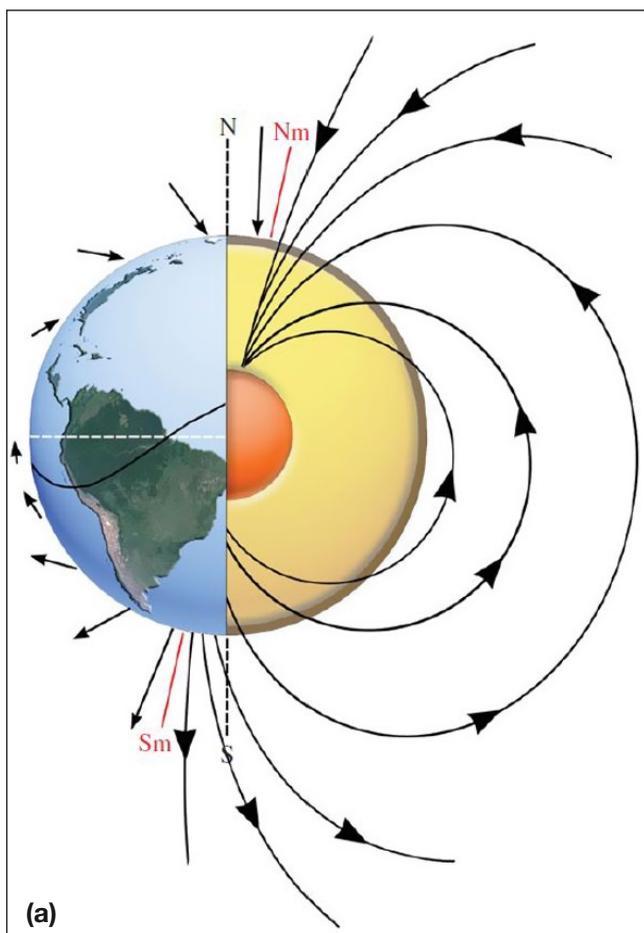


Abb. 4a + b: (a) Magnetfeld der Erde. Quelle: Shaw u. a. 2015. (b) Effekt des Winkels des eintreffenden EM-Feldes auf den Magnetsinn der Vögel. Grauer Pfeil: Inklination des Erdmagnetfeldes. Aus Ritz u. a. 2004.

Fogle u. a. 2015 zeigten, dass CRY den als „hyperkinetic“ bezeichneten Spannungssensor (oder Redoxsensor) des spannungsgesteuerten Kaliumkanals $Kv\beta$ aktiviert (im Gehirn von *Drosophila*), was zu einer erhöhten Aktionspotenzial-Feuerrate führt, wobei in einem noch nicht geklärten Zwischenschritt von CRY gebildete freie Radikale auf „hyperkinetic“ (Hk) übertragen werden.

Sherrard u. a. 2018 untersuchten die Produktion freier Radikale in *Drosophila*. PEMF-Geräte (pulsed electromagnetic field) sind Helmholtzspulen mit vordefinierten Charakteristika, die z. B. eine schnellere Heilung von Knochenbrüchen oder Wunden bewirken (Pilla 2012). Wild-Typ *Drosophila* zeigten eine Aversions-Reaktion und eine Bildung von freien Radikalen (ROS) nach Bestrahlung mit einem medizinischen PEMF-Gerät mit nonthermaler Leistung (2 mT). Bei mutanten *Drosophila* hingegen, deren Cryptochrom entfernt worden war, war dies nicht der Fall. Ein Effekt beim Wild-Typ wurde nur gefunden, wenn zusätzlich blaues (oder weißes) Licht vorhanden war, da Insekten-Cryptochrom energiereiche blaue Photonen zu seiner Aktivierung benötigt (bei roter Beleuchtung wurde kein Effekt verzeichnet). Obschon von den Autoren nicht postuliert, erlaubt dies die Schlussfolgerung, dass die Toxizität von EMF bei *Drosophila* mit dem Vorhandensein von (Blaulicht-intensivem) Kunstlicht kumuliert.

Sherrard u. a. 2018 konnten anhand von Zellkulturen des Eulenfalters (*Spodoptera frugiperda*) zeigen, dass Cryptochrom notwendig ist für die Bildung freier Radikale bei Behandlung mit PEMF-Spulen – und dies betrifft wahrscheinlich alle niederfrequenten EMF-Quellen. Ob Cryptochrom auch notwendig für oxidativen Zellstress (bei Insekten) bei Bestrahlung

mit hochfrequenten EMF ist, wurde noch nicht untersucht. Das Experiment von Bartos u. a. 2019 mit Deutschen Schaben (*Blattella germanica*) bezeugt, dass zusätzlich komplexe Wechselwirkungen zwischen dem lokalen Erdmagnetfeld (oder künstlichen Magnetfeldern) und EMF entscheidend sind bei den quantenmechanischen Vorgängen (Radikalpaar-Mechanismus) die Cryptochrom aktivieren, wie früher schon für Vögel gezeigt werden konnte (Ritz u. a. 2004, Abb. 4) und theoretisch ausführlich von Warnke analysiert worden war (Warnke 2009).

Im Gegensatz zur VGCC-Aktivierungs-Hypothese ist die Aktivierung von Cryptochrom durch EMF bei Vögeln und Insekten eindeutig bewiesen und größtenteils aufgeklärt; dies führt in einem weiteren Schritt, zumindest bei *Drosophila*, zur Aktivierung der VGCC. Die VGCC-Hypothese beruht auf vielzähligen Beobachtungen, dass EMF Calciumfreisetzung bewirken und Calciumkanalblocker vor negativen Auswirkungen schützen (Pall 2013) – jedoch sind Calcium und VGCCs an vielen Vorgängen der Neurotransmission beteiligt – z. B. an exzitatorischen Synapsen (Caddick u. a. 1999; Atlas 2013). Es spricht aber im Prinzip nichts gegen die Annahme, dass VGCCs sowohl direkt, als auch indirekt via Cryptochrom (und andere Makromoleküle) durch EMF aktiviert (geöffnet) werden können (Damulewicz und Mazzotta 2020; Catterall 2010; Littleton und Ganetzky 2000). Erwiesen ist jedoch bislang nur der Pfadweg der lichtabhängigen Aktivierung von Cryptochrom (durch EMF) in den Taktgeber-Neuronen von *Drosophila*, die zu einer erhöhten Aktionspotenzial-Feuerrate führt, und vermutlich durch erhöhte Calciumfreisetzung an den Synapsen beschriebene, aber noch nicht im Detail verstandene, schädliche Effekte hervorbringt.

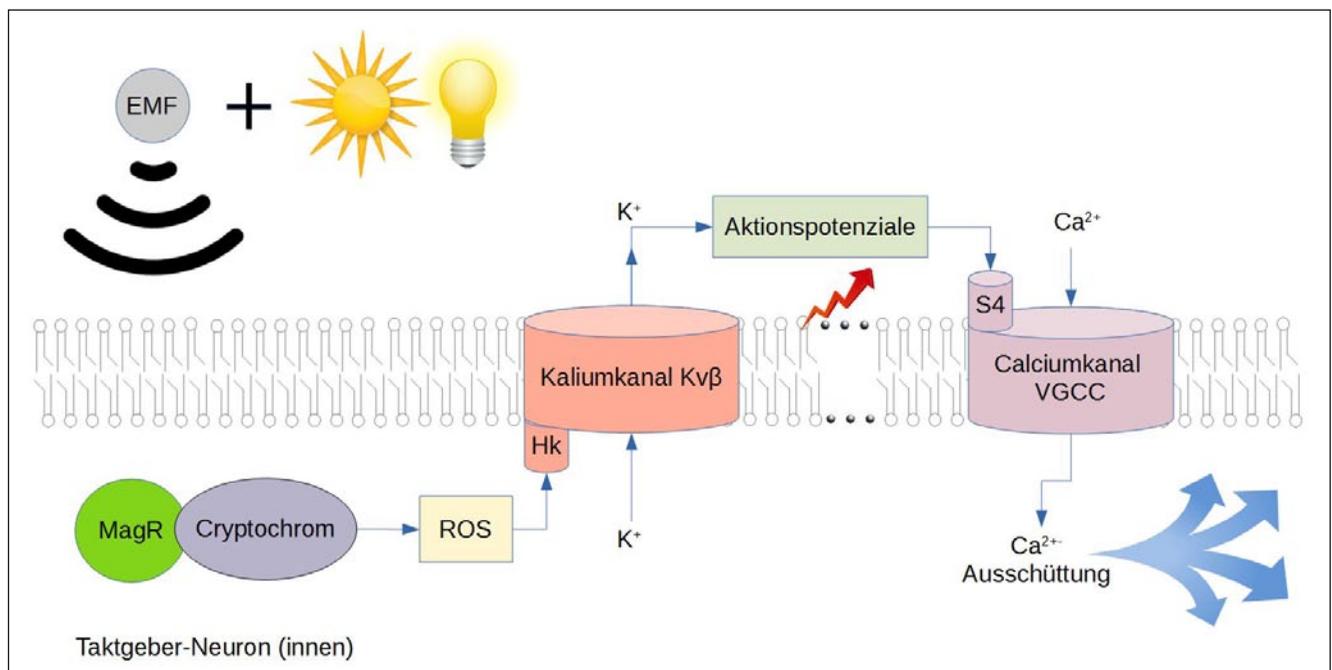


Abb. 5: Mechanismus der Cryptochrom-Aktivierung in *Drosophila* Taktgeber-Neuronen. Bei Vorhandensein von blauem (oder weißem) Licht und EMF wird Cryptochrom aktiviert und produziert freie Radikale (ROS). ROS führen zur Öffnung von Kaliumkanälen und dem Auslösen von Aktionspotenzialen, welche wiederum synaptische VGCC aktivieren. Dies führt zu einer Erhöhung des intrazellulären Calciumgehalts und Freisetzung von Neurotransmittern.

1.3 Magnetit

Alle Insekten besitzen Cryptochrome in der Netzhaut und im Gehirn. Die retinalen Cryptochrome fungieren jedoch nur bei gleichzeitigem Vorhandensein von Blaulicht als Magnetsensoren. Insekten, die (auch) in der Dunkelheit aktiv sind, scheinen stattdessen einen auf Magnetit basierten Magnetsinn zu besitzen; bei Bienen, Ameisen und Termiten wurde dies auch schon experimentell bestätigt (Lambinet u. a. 2017; Liang u. a. 2016; Shaw u. a. 2015).

Zum Mechanismus der Perzeption durch Magnetit berichten Hsu u. a. 2007: „Wir beobachteten Veränderungen in der Größe der magnetischen Körner in den Trophozyten bei der Anwendung eines zusätzlichen magnetischen Feldes zu den Zellen. Eine gleichzeitige Freisetzung von Calciumionen wurde mit einem konfokalen Mikroskop beobachtet. Diese Größenschwankung löste eine Erhöhung des intrazellulären Ca^{2+} aus, welche durch Colchicin und Latrunculin B blockiert wurde, was Blocker der Mikrotubuli- und Mikrofilament-Synthese sind. Das assoziierte Zytoskelett kann somit das Magnetosignal weiterleiten und eine neurale Antwort auslösen. Es wird ein Modell für den Mechanismus der Magnetrezeption bei Honigbienen vorgeschlagen, das auf die meisten, wenn nicht sogar auf alle magnetotaktischen Organismen, anwendbar sein könnte.“ Ebenso gut könnten jedoch beide Mechanismen gleichzeitig aber größtenteils unabhängig im Organismus ablaufen.

2. Übersicht der Forschungslage zum Thema

2.1 Vorangegangene Reviews

2.1.1 Cucurachis Review

Zitat Cucurachi u. a. 2013: „Insekten sind ein nützliches Zielsystem für die Untersuchung von HF-EMF aufgrund der begrenzten Größe, des kurzen Lebenszyklus und der Möglichkeit, Entwicklungsfehler leicht zu erkennen. (Schwartz u. a. 1985).“ Von 25 untersuchten Studien betreffend Insekten wurden 22 als „effect“ und 3 als „no effect“ bewertet.

2.1.2 Balmoris Review

Balmori 2014 berichtet über fünf Studien, die Effekte bei Insekten bezeugen oder mutmaßen lassen – so z. B. die Hypothese, dass die Blumenerkennung, die nachweislich teilweise durch Wahrnehmung elektrischer Felder geschieht, gestört werden könnte (Clarke u. a. 2013).

2.1.3 Friesens Bericht

Friesen 2014 listet etwa 64 Studien auf, die EMF-Effekte bei Insekten betreffen.

2.1.4 Redlarskis Review

Redlarski u. a. 2015 berichten über 15 Studien an *Drosophila* (alle Formen von EMF und auch statische Magnetfelder) zwischen den Jahren 1985 und 2004, von denen 13 einen Effekt fanden.

2.1.5 Eklipse-Report

Im Rahmen der europäischen Eklipse-Initiative wurde auf Anfrage der englischen NGO „Bug-Life“ ein ausführlicher Bericht verfasst (Malkemper u. a. 2018; Goudeseune, Balian und Ventocilla 2018). 39 Studien wurden identifiziert und bewertet nach ökologischen Aspekten, davon wurden 26 zusätzlich nach technischen Aspekten bewertet.

2.1.6 Vanbergen u. a. Review

Vanbergen u. a. 2019 bauen auf den Eklipse-Report auf (stammt von den gleichen Forschern). Betont wird die zweifellos erwiesene Schädlichkeit von künstlicher Nachtbeleuchtung („artificial light at night“) und die nur vermutete, aber bis jetzt unzureichend bewiesene Schädlichkeit menschengemachter elektromagnetischer Strahlung („anthropogenic radiofrequency electromagnetic radiation“). Ergänzend zum Eklipse-Report, dessen Literatursuche im Juli 2017 abgeschlossen wurde, werden hier ein paar neuere Studien miteinbezogen (hier weiter unten beschrieben), Shepherd u. a. 2018; Odemer und Odemer 2019. Zusätzlich ist laut der Meinung der Verfasser der einzig bislang klar erwiesene Effekt elektromagnetischer Strahlung die Störung der Orientierung (Wan, Zhao und Xu 2014; Sutton u. a. 2016; Bae u. a. 2016).

2.2 Weitere Vorgehensweise

Die Literaturverzeichnisse dieser Reviews wurden extrahiert und alle in ein gesammeltes Bibtex-Literaturverzeichnis integriert, mit dem opensource-Programm JabRef. Dies ergab insgesamt 159 Studien, von denen nach genauerer Betrachtung 101 die Thematik „Insekten und EMF“ behandelten.

Da die Reviews nur eine erschöpfende Übersicht der Literatur bis ins Jahr 2017 umfassten (und ausführlich nur bis 2014), wurde zusätzlich noch ein Google Scholar und PubMed-Central-Search der Jahre 2015–2020 gemacht, mit folgenden Suchbegriffen: jeweils eins von: „insect; invertebrate; animal; wildlife; biodiversity; bee; drosophila; pollinator“ UND alle folgenden Begriffe (mit „oder“): „EMR; EMF; electrosmog; electromagnetic field; electromagnetic radiation; electromagnetic“.

Diese beiden Literatursammlungen wurden kombiniert und noch weitere Studien aus der Literatursammlung des Autors hinzugefügt, was eine Gesamtmenge von 190 Studien ergab.

44 Studien betrafen allein das Thema des Magnetsinnes bei Insekten und wurden hier schon in dem Kapitel „Magnetsinn“ behandelt. 39 weitere Studien waren Reviews oder rein theoretische Abhandlungen.

Es blieben 107 Studien, die Experimente mit EMF bei Insekten betrafen. 15 Studien wurden ausgeschlossen wegen qualitativer Mängel (schlecht) oder weil sie alleinig statische magnetische oder elektrische Felder behandelten oder technische Methoden zum Untersuchen von Insekten anhand von EMF (wie RFID- oder Radar-Tracking) oder thermische Effekte (Erhitzen von Insekten mit Mikrowellen). 6 Studien waren Doppelpublikationen, d.h. es wurde zweimal über die gleichen Experimente publiziert; diese Studien wurden als irrelevant klassifiziert. 83 Studien, die spezifisch Experimente mit EMF an Insekten betrafen, wurden nun alle einzeln ausgewertet und in einer Übersichtstabelle erfasst. 2 Hochfrequenz-Studien, die reine Computersimulationen sind (Thielens 2020, Thielens 2018), wurden separat behandelt. Diese Studien sind prospektiver, aber nicht empirischer Natur und lieferten daher keine Datenpunkte für die Grafiken – sehr wohl aber Aussagen über die in Zukunft zu erwartenden Auswirkungen.

Anzahl nach verwendeten EMF:

Niederfrequenz: 29 Studien

Hochfrequenz: 55 Studien (63 Experimente)

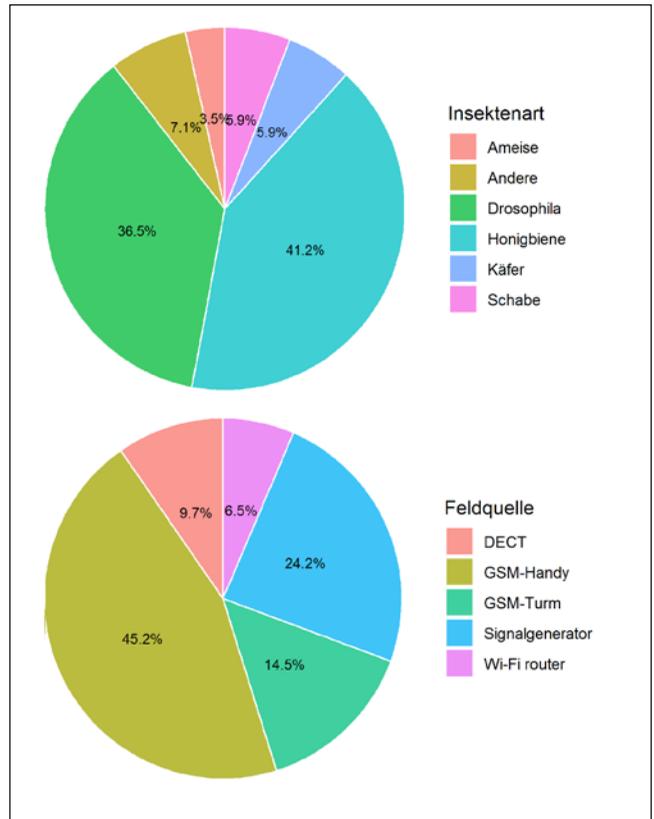


Abb. 7: Veröffentlichungen nach Insektenarten und hochfrequenten EMF-Quellen

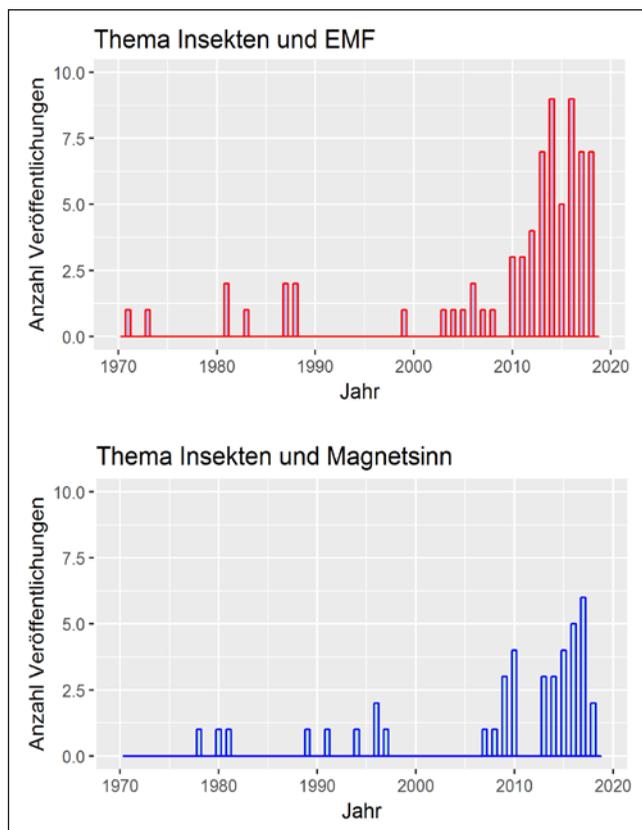


Abb. 6: Anzahl der Veröffentlichungen pro Jahr

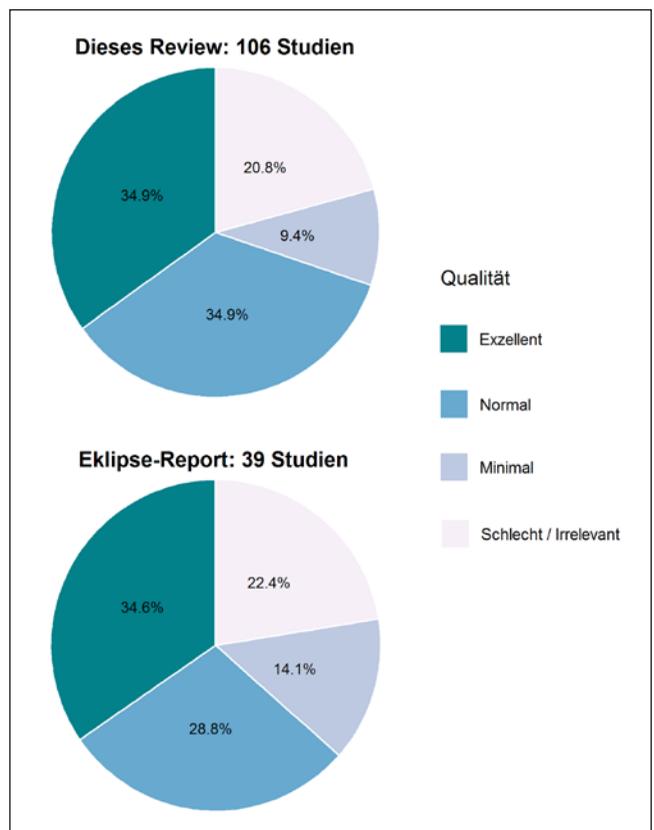


Abb. 8: Einstufung der Qualität der Studien: EKLIPSE-Report im Vergleich zu diesem Review. Für den Eklipse-Report: Durchschnittswert aus Bewertungen laut biologischen und technischen Aspekten

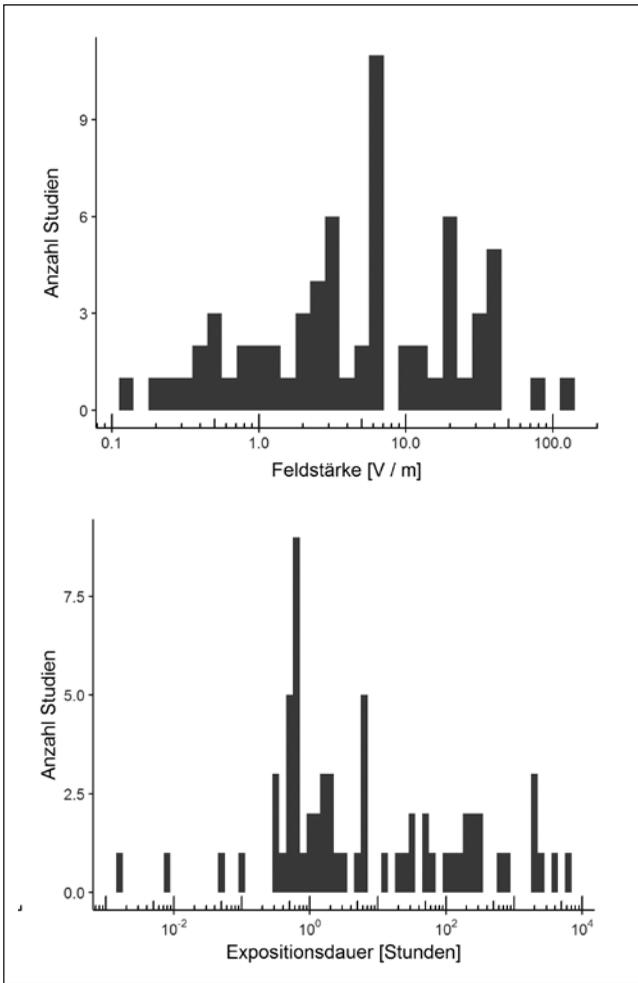


Abb. 9: Anzahl der Veröffentlichungen nach Feldstärke und Expositionsdauer (Datenpunkte aus 55 HF-EMF Studien).

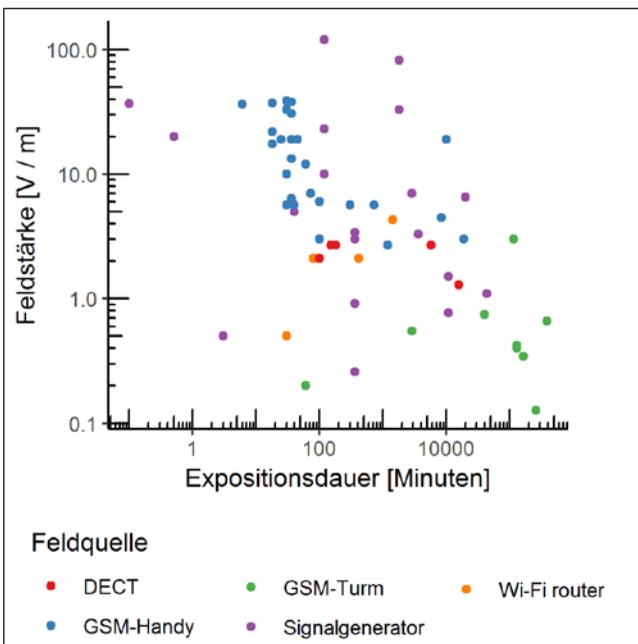


Abb. 10: EMF-Feldstärke zur Dauer der Exposition (Datenpunkte aus 55 HF-EMF Studien).

In den 55 Hochfrequenz-Studien wurden Strahlungsintensitäten (d.h. elektrische Feldstärken) von 0,04 bis 38.200 mW/m² respektive 0,13 bis 120 V/m verwendet. Die Expositionsdauer der Insekten zum EMF lag zwischen 6 Sekunden und 9 Monaten. Aus den Quantitäten Feldstärke und Expositionsdauer kann die Strahlungsdosis (Feldstärke × Zeit) berechnet werden. Für eine Metaanalyse nötige statistische Angaben waren nur bei einer Handvoll Studien vorhanden, obschon viele Studien signifikante Befunde aufzeigten ($p < 0,05$) und es für die Autoren vermutlich nur ein geringer Aufwand gewesen wäre, zusätzliche Angaben wie Konfidenzintervalle (CI) oder Standardabweichungen (SD) vorzunehmen. Es konnte somit keine „state-of-the-art“ Analyse mit Betrachtung der Publikationsverzerrung gemacht werden.

Stattdessen wurden in Studien beschriebene schädliche Wirkungen im Einzelnen und die allgemeine Schädlichkeit (der EMF) mit einer 4-Punkte-Skala geschätzt (0 = keine, 1 = geringfügige, 2 = mittelstarke, 3 = starke Wirkung), gemäß dem gleichen System, was auch der IPBES (Potts u.a. 2016) und der Eklipse-Report (Malkemper u.a. 2018; Goudeseune, Balian und Ventocilla 2018) verwendet haben. Die „Cut-Offs“ wurden bei einer Veränderung von jeweils 10 %, 25 % und 50 % einer Variablen festgelegt. Die Kategorien für beobachtete Effekte (Variablen): allgemeine Schädlichkeit, Gedächtnis, Sinnesfunktion, Vermehrung/Gene, Orientierung, Präferenz, oxidativer Stress. Die allgemeine Schädlichkeit wurde dadurch bestimmt, dass die Variable mit dem größten Ausmaß an (signifikanter) prozentualer Änderung als ausschlaggebend betrachtet wurde (z.B. Zuweisung einer 3 bei Zunahme der DNA-Schäden um 50 % oder mehr, auch wenn alle anderen gemessenen Variablen weniger als 50 % Abweichung zur Kontrolle aufweisen). Die Qualität jeder Studie wurde ebenfalls mit einer 4-Punkte-Skala geschätzt (Potts u.a. 2016).

Die Schätzwerte der Toxizität sind, wie der Name ausdrückt, keine exakten und definitiven Befunde, da sie auf Studien beruhen, die in der Mehrheit nicht nach den (z.B. in der Toxikologie) üblichen Sorgfaltskriterien durchgeführt wurden und in den meisten Fällen auch nicht repliziert worden sind. Zusätzlich basieren sie nur auf einer 4-Punkte-Skala, die keine genaue Angaben erlaubt, aber zumindest eine grobe Einschätzung. Rückblickend auf die Geschichte der Wissenschaft lässt sich jedoch sagen, dass schädliche Wirkungen oft früh erkannt und beschrieben worden sind, jedoch ignoriert wurden – z.B. Asbest, Blei und Zigaretten betreffend – und es Jahrzehnte gedauert hat, bis die Mechanismen verstanden wurden und der offizielle Standpunkt sich änderte. Die Europäische Umweltagentur EUA hat hierzu eigens, unter dem Namen „Späte Lehren aus frühen Warnungen“, mehrere Berichte angefertigt (Gee u.a. 2013).

Bezüglich der mutmaßlichen Schädlichkeit verschiedener EMF-Quellen (Abb. 11): der Signalgenerator scheint weniger schädlich zu sein als die eigentlichen handelsüblichen EMF-Typen bei gleicher Feldstärke. Die meisten Signalgeneratoren erzeugen nicht die charakteristischen starken und zufälligen Schwankungen, die z.B. ein Handy im Sprechmodus oder aktives WLAN abstrahlt.

Ebenso sind Mobilfunktürme scheinbar unbedenklicher als GSM-Handys, obschon beide die gleiche Signalcharakteristik haben. Die Feldstärke des Signals der Mobilfunktürme lag im Bereich von durchschnittlich 1,7 V/m (Medianwert 0,66 V/m), währenddessen die Feldstärke bei Exposition mit GSM-Handys durchschnittlich 10,8 V/m betrug (Medianwert 6,5 V/m), vgl. Abb. 10. In Leistungsdichten umgerechnet lässt sich der quantitative Unterschied leichter erfassen (Medianwerte): Mobilfunkurm 1,15 mW/m², GSM-Handy 112 mW/m². Dies deutet darauf hin, dass die aktuell typischen Feldstärken von Mobilfunktürmen relativ gesehen weitaus weniger schädlich als GSM-Handys, DECT und WLAN sind. Wahrscheinlich sind die momentan typischen Feldstärken der Mobilfunktürme noch zu schwach, um schnell (innerhalb von Tagen oder Stunden) starke biologische Effekte zu verursachen, wobei einige Experimente nach mehreren Monaten dennoch schädliche Auswirkungen fanden.

Der Schätzwert der Schädlichkeit wurde auch normalisiert berechnet, d.h. geteilt durch die Strahlungs dosis. Die LF-EMF von Hochspannungsleitungen oder Helmholtz-Spulen sind bei dieser Betrachtung verhältnismäßig wesentlich weniger schädlich als alle getesteten HF-EMF (siehe auch Abb. 12).

3. Kommentierte Auflistung einzelner Studien

3.1 Niederfrequente elektromagnetische Felder („low frequency“, LF-EMF)

Schon 1976 berichten Altmann und Warnke 1976: „*Bienen im 50-Hz-Hochspannungsfeld zeigen einen erhöhten Stoffwechsel infolge gesteigerter motorischer Aktivität. Bei geringen Feldstärken (unter ca. 10 kV/m) ist die Stoffwechselerhöhung bei verschiedenen gekäfigten Bienengruppen nicht einheitlich. Bei mittleren Feldstärken (ca. 20 kV/m–40 kV/m) ist die Stoffwechselerhöhung mit der Feldstärke korreliert. Bei hohen Feldstärken (über ca. 50 kV/m) erfolgt gegenseitiges Abstechen.*“ Andere Forscher haben die gleichen Effekte bestätigt sowie eine Störung der Orientierung belegt: Wellenstein 1973; Greenberg u.a. 1981; Bindokas, Gauger und Greenberg 1988; Korall, Leucht und Martin 1988.

Ramirez u.a. 1983 führten folgendes Experiment durch: Ein Magnetfeld von 100 µT Stärke bei 50-Hz-Netzfrequenz wurde auf eierlegende Drosophila angewandt. Hierbei ergab sich eine deutlich verringerte Eiablage in der Magnetfeld-Gruppe im Vergleich zur Kontrolle.

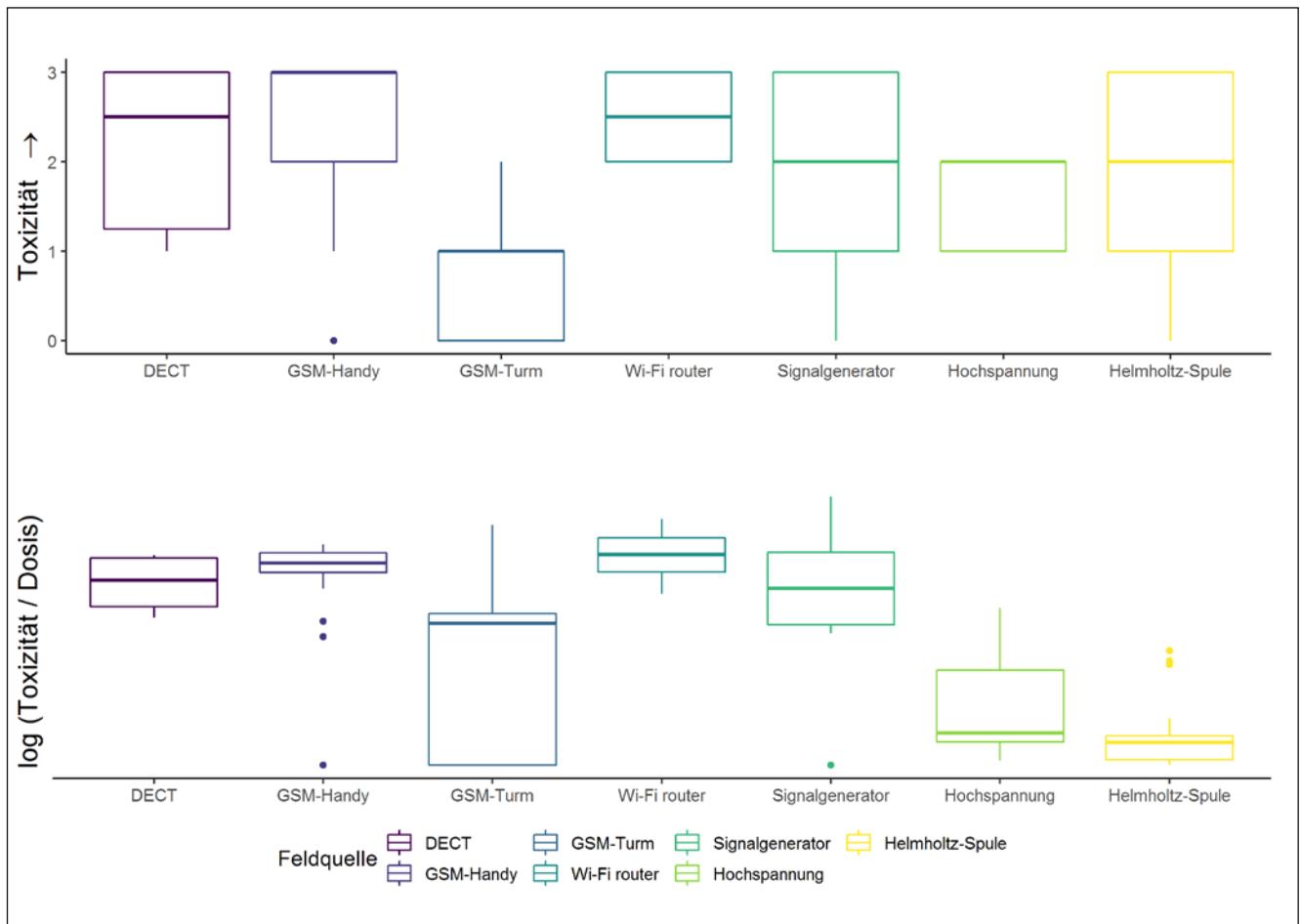


Abb. 11: Oben: Mutmaßliche Toxizität für Insekten nach EMF-Typ (Schätzwert). Untere Grafik: Relative Schädlichkeit nach EMF-Typ (Schätzwert), normalisiert auf die Strahlungsdosis, d. h. geteilt durch Produkt aus Feldstärke mit Expositionsdauer [V/m × min], auf einer log₂-Skala dargestellt. Zum Vergleich der HF-EMF mit den LF-EMF wurden alle Werte der magnetischen Feldstärke [T] in elektrische Feldstärke [V/m] konvertiert (siehe Anhang).

3.1.1 Shepherd 2018, 2019

Shepherd u. a. 2018 und Shepherd u. a. 2019 untersuchten die Auswirkungen der EMF von Hochspannungsleitungen (50-Hz-Netzfrequenz) auf Honigbienen (*Apis mellifera*). Verwendet wurden eigens angefertigte Spulen, mit denen ein Magnetfeld von 20–7.000 μT erzeugt werden kann, mit der gleichen Charakteristik wie bei einer Hochspannungsleitung. Niederfrequente EMF stören die Parameter Nahrungsaufnahme, Flugverhalten, Lernen (Proboscis-Extensions-Reflex) und die Gedächtnisbildung signifikant ab einer Feldstärke von 100 μT . Bei 7.000 μT ist zusätzlich die Flügelschlagfrequenz signifikant erhöht.

Zitat: „Es wurde festgestellt, dass die ELF-EMF-Exposition das Lernen reduziert, die Flugdynamik verändert, den Erfolg der Nahrungssuche und der Fütterung verringert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass 50-Hz-ELF-EMFs, die von Stromleitungen emittiert werden, einen bedeutenden Umweltstressor für Honigbienen darstellen können, mit dem Potenzial, sich auf ihre kognitiven und motorischen Fähigkeiten auszuwirken, was wiederum ihre Fähigkeit, Pflanzen zu bestäuben, verringern könnte.“

Shepherd u. a. 2019 fanden zusätzlich (um 60 %) erhöhte Aggression bei Bienen, die 100 μT ausgesetzt waren, im Vergleich zur Kontrolle und bestätigten die negativen Effekte auf das Kurzzeitgedächtnis, die in ihrer früheren Studie beobachtet worden waren.

In seiner Doktorarbeit (Shepherd 2018) hat Shepherd zusätzlich die kombinierte Wirkung von EMF mit dem Neonicotinoid Clothianidin getestet und stellte hierbei eine reduzierte Schädlichkeit des EMF im Vergleich zur Kontrolle fest.

Zitat: „Diese Ergebnisse liefern einen ersten Hinweis darauf, dass ELF-EMF, die in der Umwelt auftreten können, kritische Verhaltensweisen und biologische Prozesse bei wichtigen Insekten beeinflussen können, was die Notwendigkeit größerer Feldstudien zur Bestimmung der Auswirkungen von ELF-EMF auf die Umwelt unterstützt und Vorschläge für weitere Untersuchungen zur Aufklärung der Mechanismen der biologischen Auswirkungen von ELF-EMF liefert.“

3.1.2 Erdoğan 2019

Im ersten Versuch von Erdoğan 2019 wurden 36 Bienenstöcke in 4 Reihen aufgestellt und ein Elektrozaun vor den Bienenstöcken installiert. Ein Teil der Bienenstöcke wurde mit geerdetem Fliegengitter abgeschirmt vor den niederfrequenten EMF des Elektrozauns. Anzahl der Arbeiterinnen, Honigerträge und Brutfläche waren signifikant geringer bei den exponierten Völkern im Vergleich zu abgeschirmten Kontrollen.

In ihrem zweiten Versuch befassten sich Erdoğan und Cengiz 2019 mit der Präferenz von Futterquellen, wobei Magnetspulen mit 0, 50, 100, 150 und 200 μT zusammen mit

Futterquellen aufgestellt wurden. Dies ergab eine starke Bevorzugung der Futterquellen mit geringer Feldstärke sowie auch längere Aufenthaltszeiten an diesen Futterquellen.

3.1.3 Todorović 2019

Todorović u. a. 2019 nutzten 50-Hz-Netzfrequenz (10 mT) an Larven von Argentinischen Schaben (*Blattella germanica*) während 5 Monaten und fanden signifikant reduzierte Verdauungstrakt-Masse, GST-Aktivität sowie signifikant erhöhte CAT- und SOD-Aktivität, was auf erhöhten oxidativen Stress hinweist.

3.1.4 Maliszewska 2018

Maliszewska u. a. 2018 nutzten 50-Hz-Netzfrequenz (7 mT) an Amerikanischen Schaben (*Periplaneta americana*) und fanden signifikant erhöhte Malondialdehyd-Werte – einem Indikator von oxidativem Stress (nach 24 h) sowie signifikant reduzierte Glutathion-Werte (GSH) nach 7 Tagen Bestrahlung. Zusätzlich verringerte sich die Reaktionsgeschwindigkeit auf Hitze beträchtlich.

3.1.5 Wyzkowska 2016

Wyzkowska u. a. 2016 platzierten Wüstenheuschrecken in ein wechselndes Magnetfeld (4 mT, 50 Hz) und fanden reduzierte Aktivität. Im Zell-Assay bei 7 mT wurden signifikant erhöhte HSP70 gemessen, ähnlich hohe Werte wie in einer erhitzten Probe. Betrachtung des Extensor-Tibiae (Sprungmuskel) und dessen Ganglions ergaben veränderte Aktionspotentiale (länger und stärker bei 7 mT im Vergleich zur Kontrolle) sowie geringere Muskelkraft.

3.1.6 Zhang 2016

Zhang u. a. 2016 zeigten, dass thermischer Stress (35 °C) und EMF-Exposition (50 Hz, 3 mT) einen synergistischen Effekt auslösen, der die negative Wirkung von EMF auf Lebensdauer, Fortbewegung und oxidativen Stress bei *Drosophila melanogaster* verstärkt.

3.2 Hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF): Rezente Studien

3.2.1 Panagopoulos 2019, [...] 2006

Panagopoulos hat eine Reihe an Experimenten mit *Drosophila* gemacht, hier nachfolgend nur ein Auszug, da eine detaillierte Beschreibung der Gesamtheit der Experimente den Rahmen sprengen würde: Panagopoulos 2019; Panagopoulos 2017; Panagopoulos, Cammaerts u. a. 2016; Panagopoulos, Johansson und Carlo 2015b; Panagopoulos, Johansson und Carlo 2015a; Panagopoulos, Karabarbounis und

Lioliouis 2013; Panagopoulos 2012; Panagopoulos, Chavdoula und Margaritis 2010; Panagopoulos und Margaritis 2010; Panagopoulos, Chavdoula, Karabarbounis u. a. 2007; Panagopoulos, Chavdoula, Nezis u. a. 2007; Panagopoulos, Karabarbounis und Margaritis 2004; Panagopoulos, Karabarbounis und Margaritis 2002.

Panagopoulos hat seine eigenen Ergebnisse aus vielen Experimenten und über 10 Jahren Forschung kürzlich zusammengefasst (Panagopoulos 2017). Dimitris J Panagopoulos 2019 untersuchte die Wirkung eines sendenden GSM-Handy auf Entwicklung von Drosophila-Ovarien und fand eine signifikant erhöhte Anzahl von DNA-Strangbrüchen gegenüber der unbestrahlten Kontrolle. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass 36 Minuten GSM-Exposition deutlich schädlicher sind als 120 Stunden Exposition durch ein 2 mT niederfrequentes Magnetfeld (Abb. 12. Helmholtzspule, ähnlich den oben beschriebenen LF-EMF Experimenten).

Zitat aus Saliev u. a. 2019 bezüglich Panagopoulos 2011: „Der Unterschied der Auswirkungen von modulierten und nicht modulierten EMF auf die Reproduktionsfähigkeit von Insekten wurde von Panagopoulos untersucht. Die experimentellen Daten zeigten, dass die Exposition mit dem nicht-modulierten GSM 900-MHz-Signal nicht zu einer Verminderung der Reproduktionsfähigkeit der Insekten führte, während das modulierte GSM 900-MHz-Signal eine Verminderung der Reproduktion verursachte. Es wurde klar gezeigt, dass das modulierte GSM-Signal (Sprech-Modus) einen signifikanteren Einfluss auf die Oogenese der Insekten hatte. Darüber hinaus wurden die Bioeffekte von GSM-900-MHz- und GSM-1.800-MHz-Signalen untersucht und mit demselben biologischen Modell verglichen. Bei beiden Arten von GSM-Strahlung wurde ein Rückgang der Repro-

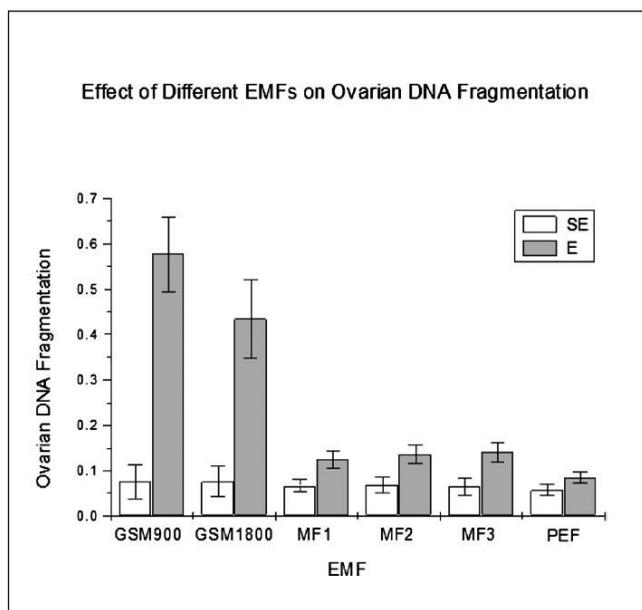


Abb. 12: Einfluss von GSM und niederfrequenten Magnetfeldern auf die DNA-Strangbruchrate in Drosophila-Ovarien (MF1 = 0,1 mT, MF2 = 1 mT, MF3 = 2 mT). Kontrollen (SE) im Vergleich zu exponierten Ovarien (E). Quelle: Panagopoulos 2019.

duktionskapazität festgestellt. Die Arbeit von Panagopoulos stimmt mit anderen Berichten über den Einfluss der Strahlung von Mobiltelefonen auf die Fortpflanzungsfunktionen und die Embryogenese überein.“

Erwähnenswert sind die Experimente in Panagopoulos, Chavdoula und Margaritis 2010, wo maximale Schädlichkeit bei jeweils 0 cm und 30 cm Abstand von einem GSM-Handy festgestellt wurde (und deutlich geringere Schädlichkeit im dazwischenliegenden Bereich). Panagopoulos und Margaritis 2010 führen dies auf ein „intensity window“ zurück, wie schon frühere Forscher (Salford u. a. 2008). Bei Drosophila scheint dieses bioaktive Fenster bei einer Intensität von etwa 100 mW/m² zu liegen (6 V/m), was in etwa einem Abstand von 30 Metern von einem GSM-Handymast entspricht.

3.2.2 Manta 2017, 2014

Eine von Margaritis und Manta durchgeführte Studie (Margaritis u. a. 2014), das Ergebnis von 280 Experimenten, zeigt eine Erhöhung der reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) in den Eierstöcken von Drosophila nach Exposition mit hochfrequenten Feldern. Getestet wurden GSM-Handy, DECT-Basis und -Handset, WiFi-Router, Bluetooth, Babyfon, Mikrowellenofen, 900 MHz unmoduliert (Oszilloskop) und FM-Radio. Als besonders schädlich erwiesen sich das GSM-Handy und DECT, jedoch waren auch alle anderen getesteten künstlichen EMF leicht schädlich in dem Sinne, dass sie zu reduzierter Fruchtbarkeit und erhöhtem Zelltod in den Ovarien führten.

Manta u. a. 2017 bauen auf der 2014er Studie auf und haben spezifisch die Produktion freier Radikale und das genetische Profil (Geninduktion) untersucht. 168 Gene wurden durch Bestrahlung per GSM-Handy (270 mW/m² = 10 V/m während 30 min) differenziert ausgedrückt, davon 15 downreguliert, unter anderem das Cryptochrom-Gen. Verstärkt exprimiert wurden eine Reihe Gene des antioxidativen Zyklus und Gene, die mit Reparaturmechanismen assoziiert sind.

3.2.3 Singh 2020

Singh u. a. 2020 bestrahlten Drosophila während 5 Tagen mit einer 2.400 MHz-Hornantenne und fanden deutliche Unterschiede in der Gehirnmorphologie. Computergestützte automatische Klassifizierung von Mikroskop-Bildern des Gehirns erzielte eine Genauigkeit von 94,66 % im richtigen Zuweisen der Bilder (bestrahlt oder unbestrahlt), obschon mit dem bloßen Auge (unter dem Mikroskop) keine deutlichen Unterschiede erkennbar waren.

3.2.4 Lopatina 2019

Lopatina u. a. 2019 untersuchten die Sinnes- und Gedächtnisfunktion von Honigbienen bei Bestrahlung mit einem

WiFi-Router. Hierbei wurden fünf Gruppen zu 18 Bienen benutzt, von denen zwei Gruppen einem WiFi-Router (mit geschätzten 50 mW/m^2) ausgesetzt wurden und drei Gruppen als Kontrolle dienten. Die Reaktion der fixierten Bienen beim Präsentieren einer aromatisierten Zuckerlösung wurde erfasst sowie die Bildung eines konditionierten Reflexes (Proboscis-Extensions-Reflex) und das Beibehalten dieses Reflexes im Langzeitgedächtnis. Es wurden signifikante Unterschiede zwischen bestrahlten und unbestrahlten Gruppen beobachtet, was die Reaktion auf präsentiertes Futter (gestört), das Kurzzeitgedächtnis (deutlich verschlechtert) und Langzeitgedächtnis (leicht verbessert) betrifft. Das gesamte Experiment wurde ein Jahr später wiederholt, mit gleichen Befunden.

3.2.5 Odemer 2019

Odemer und Odemer 2019 untersuchten die Entwicklung von Honigbienen-Königinnen bei Vorhandensein von einem sendenden GSM-Handy im Bienenstock (etwa $2,2 \text{ V/m}$ oder 13 mW/m^2). Die Entwicklung der Larven zu Königinnen wurde hierbei signifikant beeinträchtigt (40 % Rückgang), im Vergleich zur Kontrolle. Andere Entwicklungsparameter blieben jedoch gleich zwischen bestrahlten und unbestrahlten Königinnen und deren Kolonien.

3.2.6 Vilić 2017

In Vilić u. a. 2017 wurden Honigbienenlarven 900-MHz-Strahlung während 2 Stunden ausgesetzt, unmoduliert (4 Feldstärken) und moduliert (80 % 1 kHz, 217 Hz). DNA-Schäden waren bei modulierter, jedoch nicht bei unmodulierter Strahlung signifikant erhöht. Der TBARS-Wert („thiobarbituric acid reactive substance“), ein Indikator für Lipid-Peroxidation und oxidativen Stress, war jedoch signifikant reduziert in allen bestrahlten Gruppen – was auf reduzierten oxidativen Stress hinweist. Die Autoren fassen die Resultate anderer, ähnlicher Studien zusammen, wobei etwa ein Drittel einen Anstieg, ein Drittel einen Abfall und die restlichen Studien konstante oder variable Oxidationsparameter fanden. Die Schlussfolgerung ist, dass die Effekte von Hochfrequenz-EMF komplex und sowohl vom Typ des untersuchten Lebewesens (z. B. Insekt, Regenwurm, Ratte) als auch vom Entwicklungszustand (z.B. Ei, Larve, Adult) und der Einwirkdauer abhängig sind.

3.2.7 Taye 2017

Taye u. a. 2017 verwendeten insgesamt 20 Bienenstöcke, platziert auf 5 verschiedenen Entfernungen von einem Mobilfunkmasten (100, 200, 300, 500 und 1.000 Meter), beobachtet während 6 Monaten, bei sehr schwachen Strahlungsintensitäten ($20\text{--}80 \text{ }\mu\text{W/m}^2$). Zitat Taye: „Die Flugaktivität und die Rückkehrfähigkeit der Arbeiterinnen waren maximal in Bienenvölkern, die in 500 m und minimal in 100 m Entfernung vom Mobilfunkmast aufgestellt waren.“

3.2.8 Favre 2017, 2011

In Favre 2017 wurde das schwache lokale GSM-Signal (1 mW/m^2) erfasst, verstärkt und dann auf einen nahe gelegenen Bienenstock projiziert, mit einer Richtantenne. Das verstärkte Signal hatte eine Leistungsintensität im Bereich von $80\text{--}100 \text{ }\mu\text{W/m}^2$ ($0,17$ bis $0,19 \text{ V/m}$) direkt vor der Sendantenne und ca. 1 bis $2,5 \text{ }\mu\text{W/m}^2$ ($0,02$ bis $0,03 \text{ V/m}$) in der Frontseite des Bienenstocks (innen). Favres Bienen reagierten mit dem (akustisch aufgezeichneten) Pfeifenton – ein Signal, das mit Gefahr oder Verlagerung des Bienenstocks assoziiert ist – innerhalb von 1 Stunde nach Beginn der GSM-Bestrahlung und dies wurde 5 Mal getestet. In der Pilotstudie Favre 2011 wurde statt des GSM-Repeater ein GSM-Handy direkt in den Bienenstock gelegt – auch hier war der Pfeifenton die Reaktion der Bienen. Dieses Experiment wurde zwölfmal wiederholt, mit jeweils verschiedenen Bienenstöcken.

3.3 Hochfrequente elektromagnetische Felder: Ältere Studien

3.3.1 Lázaro 2016

Lázaro u. a. 2016 verwendeten Schwenkfallen in bestimmten Abständen (50, 100, 200, 400 m) um fünf Mobilfunkmasten auf der griechischen Insel Limnos und fünf Türmen auf Lesbos. Von 17.000 gesammelten Insekten, 3.700 Wildbienen, 800 Wespen und 7.000 Käfern wurden folgende Tendenzen festgestellt: Vermeidung hoher EMF-Werte für Käfer und Wespen, aber Anziehung auf Wildbienen (mehr Wildbienen in der Nähe von Antennen gefangen) – mit einer deutlicheren Tendenz der Anziehung für bodenbrütende Wildbienen im Gegensatz zu oberirdisch nistenden Wildbienen. Die Leistungsdichten reichten von $0,1 \text{ V/m} = 26 \text{ }\mu\text{W/m}^2$ bis $0,7 \text{ V/m} = 1.300 \text{ }\mu\text{W/m}^2$.

3.3.2 Geronikolou 2014

Geronikolou u. a. 2014 verglichen die Wirkung von 900 MHz (Handy) und 1.900 MHz (DECT-Handset) Bestrahlung auf Drosophila-Eier (100 Minuten im Nahfeld). Es wurde eine signifikante Abnahme der Fruchtbarkeit (bspw. Anzahl gelegter Eier) festgestellt.

3.3.3 Chavdoula 2010

Drosophila wurden während 6 Minuten pro Tag einem GSM-Handy im Anrufmodus unterworfen. Zitat Panagopoulos, Chavdoula und Margaritis 2010: „Intermittierende Expositionen mit 10-minütigen Intervallen zwischen den Expositionssitzungen erwiesen sich als fast gleichwertig wirksam als kontinuierliche Exposition von gleicher Gesamtdauer, während längere Intervalle zwischen den Expositionen dem Organismus die Zeit zu geben schienen, die er benötigt, um sich zu erholen und die oben genannten Wirkungen der GSM-Exposition teilweise zu überwinden.“

3.3.4 Cammaerts 2014, 2013, 2012

Cammaerts, De Doncker u. a. 2012; Cammaerts, Rachidi u. a. 2013 und Cammaerts und Johansson 2014 beschreiben drei Experimente an Ameisen im Labor, die eine Vermeidung von EMF, Störung des Gedächtnisses, der Orientierung und des Bewegungsablaufes vorgefunden haben. Cammaerts empfiehlt die Wiederholung eines ähnlichen Setups mit Bienen.

3.3.5 Kumar 2011–2013

Kumar, Sangwan und Badotra 2011 untersuchten die Wirkung einer Handy-Exposition auf verschiedene Biomoleküle in erwachsenen Arbeiter-Honigbienen. Jeweils zehn Honigbienen wurden aus einer Wabe entnommen und in einem kleinen Käfig mit zwei Handys im Sprechmodus bestrahlt. Die Expositionsdauer betrug 10, 20 oder 40 Minuten. Die Konzentration verschiedener Biomoleküle stieg signifikant an. Kumar 2012 und Kumar, Rana und Kalia 2013 untersuchten die Wirkung einer Handy-Exposition auf verschiedene Biomoleküle in der Samenflüssigkeit (2012) und Hämolymphe (2013) von Honigbienen-Drohnen (gleiches Setup wie das vorangegangene Experiment, Expositionsdauer 30 Minuten). Samenflüssigkeit: die Konzentration der Kohlenhydrate, Proteine und Lipide stieg an, im Vergleich zur Kontrolle, und die Aktivität von diversen Enzymen war reduziert. Hämolymphe: Die Konzentration verschiedener Biomoleküle stieg unter dem Einfluss von EMF an, z. B. von 1,65 mg/ml auf 2,75 mg/ml für Kohlenhydrate, 3,74 mg/ml auf 4,85 mg/ml für Proteine und von 0,325 mg/ml auf 1,33 mg/ml für Lipide.

3.3.6 Stever & Kuhn 2006, 2005

In der Pilotstudie Stever, Kuhn u. a. 2006 untersuchten Stever und Kuhn die Auswirkungen von DECT-Basisstationen (bei 2,5 mW Durchschnittsleistung oder etwa 1,4 mW/m²) auf Orientierungssinn einzelner Honigbienen und Entwicklung von Bienenvölkern. Acht von insgesamt sechzehn Bienenstöcken wurden während 11 Tagen DECT-Basisstationen ausgesetzt. Der Orientierungssinn war bei der bestrahlten Gruppe signifikant schlechter, die Entwicklung der Bienenstöcke auch. Stever, Kimmel u. a. 2006 wiederholten das Experiment und studierten nochmals den Orientierungssinn (Dauer bis zur Rückkehr, Anzahl Rückkehrer) mit dem gleichen Aufbau und konnten den störenden Effekt von DECT bestätigen.

3.4 „No-effect“-Studien

3.4.1 Miyan 2014

Miyan 2014 verwendete 35 Bienenstöcke, in 5 Expositionsgruppen, in 0–800 m Abstand von einem Mobilfunkmast. Es wurden keine Unterschiede zwischen den Expositionsgruppen festgestellt, was alle gemessenen

Parameter, z. B. Honigproduktion, Pollensammlung, Vermehrung, Stockgröße usw. betrifft. Direkt am Mobilfunkmast wurde eine Leistungsdichte von durchschnittlich 0,423 V/m gemessen (475 µW/m²), alle anderen Werte waren unterhalb 0,01 V/m (25 µW/m²), was sehr niedrige, in Europa kaum vorzufindende Werte sind. Auch der Maximalwert bei 0 m lag unterhalb des Schwellenwertes, wo Experten eine schädliche Wirkung mutmaßen, d. i. 1.000–100.000 µW/m² (Cucurachi u. a. 2013; Panagopoulos und Margaritis 2010).

3.4.2 Hoofwijk 2013

Im Jahr 2011 hat ein Experiment der Gruppe um Tjeerd Blacquiere (Hoofwijk und Blacquiere 2013) Indikatoren für die Toxizität von Mobilfunkmasten gegenüber Honigbienen untersucht. Der Versuchsaufbau bestand aus 20 Bienenstöcken, die in zwei getrennten Behausungen untergebracht waren. 10 Bienenstöcke waren mit Metallgewebe abgeschirmt, 10 waren der Strahlung des nahe gelegenen Mobilfunkmastes ausgesetzt. Alle Experimente wurden doppelblind durchgeführt. Das Testgelände mit den beiden Behausungen befindet sich 230 m von einem Handymast entfernt, in direkter Sicht. Die GSM 900-MHz-Intensität vor Ort, außerhalb der Behausungen, lag bei durchschnittlich 0,5 V/m oder etwa 660 µW/m².

Die Autoren fassen die Ergebnisse des Experiments zusammen: *„Unsere Untersuchungen zeigen, dass Kolonien aus der exponierten und der Kontrollgruppe einen vergleichbaren Entwicklungserfolg vom Ei über die Larve bis zur erwachsenen Biene hatten, vergleichbare Orientierungsfähigkeiten, eine vergleichbare Leistung in ihrer Erwachsenenphase, beim Schlüpfen vergleichbare morphometrische und physiologische Parameter, eine vergleichbare Langlebigkeit, eine vergleichbare Entwicklung auf Kolonieebene (Produktion von Brut und jungen Bienen), jedoch sich im Winterüberleben unterschieden in dem Sinne, dass mehr nicht-exponierte (9/10) als exponierte Kolonien (3/10) überlebten. Dieser Parameter war jedoch statistisch nicht testbar, da die Kolonien alle gemeinsam zu 10 Stöcken in ihrer jeweiligen Behausung überwinterten. Dieses Experiment sollte mit mindestens 30 exponierten und 30 abgeschirmten Bienenstöcken wiederholt werden, die jeweils separat oder in kleinen Gruppen untergebracht sind, um die Möglichkeit zu verringern, dass ein Parasit ein ganzes Haus infiziert, da die exponierten Bienenstöcke in dem oben genannten Experiment hohe Infektionsraten mit Varroamilben hatten.“*

4. Bilanz der Forschungslage und des Wissensstandes Anfang 2020

Übersicht der Studienlage:

Hochfrequente EMF: Effekt gefunden in 56 von 64 Experimenten in 46 von 55 Studien.

Niederfrequente EMF: Effekt gefunden in 26 von 29 Studien.

Der gefundene Effekt war in den meisten Fällen schädlicher Art, in seltenen Fällen neutral. In einer Studie (Makarov und Khmelinskii 2016) konnte gezeigt werden, dass sowohl negative als auch positive Effekte durch Ändern der Parameter eines 3D LF-EMF erzielt werden können.

Allgemeine Betrachtungen und Empfehlungen für die Zukunft:

Ein experimenteller Befund, der die Hypothese der Aktivierung der VGCC – oder anderer spannungsgesteuerter Kanäle – stützt, ist, dass Schäden durch EMF erst nach längerer Bestrahlung aus einer Richtung stattfinden. Mit einem zufällig drehenden („chaotischen“) Magnetfeld kann man die Schädlichkeit von gleichzeitiger Bestrahlung mit EMF neutralisieren (Lai und Singh 2005; Litovitz u. a. 1994). In der Praxis würde man daher auch eine stärkere Schädlichkeit von EMF bei Pflanzen, als bei sich bewegenden Tieren erwarten, was experimentell auch allgemein bestätigt wurde (Halgamuge, Yak und Eberhardt 2015; Halgamuge 2016). Bei Insekten sollte der schädliche Einfluss in den frühen Entwicklungsstadien (Ei, Larve, Puppe) stärker sein als beim Adulten – Anzeichen hierfür fanden z.B. Odemer und Odemer 2019.

Es deuten erhebliche Hinweise auf viele medizinische Anwendungen von EMF hin, die darauf warten, eingesetzt zu werden (Markov 2007; Pilla 2013). Selbst wenn die derzeitigen drahtlosen EMF-Technologien im Allgemeinen – dosisabhängig – toxisch sind, legen bestehende Forschungsergebnisse nahe, dass es einfach sein sollte, die Biokompatibilität von drahtlosen Technologien erheblich zu verbessern (Lai 2004; Pilla 2006). Da, zumindest was den größtenteils aufgeklärten Mechanismus der Aktivierung von Cryptochrom betrifft, das Vorhandensein von blauem (oder weißem) Licht notwendig scheint für schädliche Auswirkungen von EMF bei Insekten, sollte der massive Einsatz künstlicher Straßenbeleuchtung überdacht werden – und gegebenenfalls Lichtquellen mit weniger Blauanteil verwendet werden (z.B. LED mit einem „warmen“ anstelle von „kaltem“ Spektrum). Für alle Insekten, die Magnetit für den Magnetsinn verwenden, z.B. alle Hymenopteren – Bienen, Wespen, Ameisen – sind hingegen schädliche Auswirkungen von EMF auch bei Abwesenheit von (Kunst-)Licht zu erwarten.

Ab welchen Feldstärken erwartet man nun Schäden bei Insekten, bzw. sind aus Experimenten als schädlich erwiesen? Panagopoulos, Chavdoula und Margaritis 2010 hat ein bioaktives Fenster in 20–30 cm Abstand von GSM-Handys festgestellt, was einer Leistungsdichte von 100 mW/m^2 entspricht oder etwa 6 V/m – wo nach kurzzeitiger Exposition (ab 10 Minuten) schon signifikante toxische Auswirkungen bei *Drosophila* beobachtet wurden – und diese Ergebnisse sind mittlerweile mehrfach repliziert worden (Chavdoula 2010, Margaritis 2014, Geronikolou 2014). Falls sich dies bei Insekten allgemein bewahrheiten sollte, wäre damit die Grenze für toxische Auswirkungen 100-fach unterhalb der aktuellen ICNIRP-Grenzwerte (10 W/m^2 oder 61 V/m , siehe Non-Ionizing Radiation Protection u. a. 2020), die nur vor thermischen Wirkungen schützen.

Für chronische Exposition wäre vielleicht bei wiederum 10-fach geringerer Leistungsdichte – d.h. 10 mW/m^2 – mit negativen Auswirkungen zu rechnen, hier ist der Stand des Wissens jedoch noch unsicher.

Momentan sind die Leistungsdichten in der Umgebung allgemein noch weit unterhalb von 10 oder 100 mW/m^2 (d.i. 2 oder 6 V/m). Eine rezente Studie hat Werte von $0,17\text{--}0,53 \text{ V/m}$ RMS im Feld gemessen ($0,1\text{--}0,8 \text{ mW/m}^2$ – Thielens, Greco u. a. 2020). Der Autor dieses Reviews hat im Rahmen seiner Masterarbeit Werte bis maximal 10 mW/m^2 RMS ($2,5 \text{ V/m}$) gemessen, aber nur in direkter Nähe (30–50 m) von LTE/GSM-Masten. Messungen von Ofcom 2020 in städtischen Hotspots (UK) fanden maximal 150 mW/m^2 (1,5 % des ICNIRP-Grenzwerts) und durchschnittlich 25 mW/m^2 (als Summe aller HF-Immissionen im Frequenzbereich 0,3–6 GHz).

In Belgien, Italien, der Schweiz, Russland und China liegen die maximal zulässigen Expositionen (Anlagengrenzwerte) für die allgemeine Bevölkerung bei 6 V/m (100 mW/m^2) oder weniger (3 V/m in Luxemburg) im Mobilfunk/WLAN Bereich, währenddessen Deutschland, die USA und viele andere Länder sich an die ICNIRP-Grenzwerte halten, die für 900 MHz bei 41 V/m (4.000 mW/m^2), bzw. ab 2 GHz bei 61 V/m (10 W/m^2) liegen (funkstrahlung.ch 2017; Woelfle 2003; Non-Ionizing Radiation Protection u. a. 2020).

36 der 64 Hochfrequenz-Experimente in diesem Review verwendeten eine Feldstärke geringer als 6 V/m (100 mW/m^2) und 30 Experimente (83 %) fanden hierbei dennoch deutliche Hinweise auf oder statistisch signifikante schädliche Auswirkungen, etwa ab 3 V/m , also auch unterhalb der besonders niedrigen Anlagengrenzwerte, wie sie nur in einigen Ländern zu finden sind. Der Anlagengrenzwert wird dort gemessen, wo sich Menschen über längere Zeit aufhalten können, also Straßen, Plätze, Wohnungen usw.

Thielens, Bell u. a. 2018 zufolge bleibt die Absorption künstlicher EMF bei Insekten relativ konstant, auch bei wesentlich höheren Frequenzen als heute allgemein üblich (z.B. 60 GHz). Die Wellenlänge von 5G ist der Körperlänge verschiedener Insekten sehr nahe, was zu resonanter Absorption führt (siehe Abb. 13). 5G wird stufenweise ausgebaut werden, in progressiv höhere Frequenzen. Da hierbei der Leistungsverlust durch Streuung, Reflexion und der geringeren Penetrationskraft höherer Frequenzen zunehmend größer wird, müsste auch die abgestrahlte Leistung der Basisstationen zunehmend erhöht werden, um ein angenehmes Funktionieren der Drahtlosverbindungen in Häusern und Vehikeln zu gewährleisten. Nach Xu u. a. 2017 soll die Leistung einer einzelnen 5G-Station (im 15 GHz-Band) etwa 10 W/m^2 auf 1 m Entfernung betragen, oder 100 mW/m^2 auf 10 m Entfernung. Nach Thors u. a. 2017 Berechnungen dürften 5G Antennen im ungünstigsten Fall jedoch nur 15 % ihrer theoretischen Maximalleistung abstrahlen und hätten den Vorteil – im Vergleich zur aktuellen Infrastruktur (1G–4G), dass die Strahlungsintensität bei Abwesenheit von Nutzern (z.B. nachts) quasi auf Null heruntergefahren würde.

Laut Messungen von Ofcom weisen 5G-Basisstationen (in UK) momentan nur Leistungen bis zu $3,8 \text{ mW/m}^2$ auf, und durchschnittlich nur $0,59 \text{ mW/m}^2$ in städtischen Hotspots (Ofcom 2020). Da die Infrastruktur jedoch noch sehr rudimentär ist und die Anzahl der Nutzer gering, sind diese Zahlen in Zukunft womöglich um ein Vielfaches höher, zumal bei 5G die Antennenleistung direkt von der Anzahl der benutzten Kanäle, also der Endbenutzer, abhängig ist. Rezente Messungen des ANFR bei 5G-Pilotprojekten in Frankreich fanden höhere Werte, z. B. etwa 6 V/m (100 mW/m^2) auf 150 Meter Entfernung, bei maximaler Antennenleistung, und etwa $3,5 \text{ V/m}$ (32 mW/m^2) beim Endgerät im Fall eines 10-Gigabyte Downloads (ANFR 2020). Dies ist jedoch nur eine grobe Schätzung, da die neue „beamforming“-Technik die Strahlung aus typischerweise 64 Einzelantennen pro 5G-Station präzise auf Endgeräte fokussiert (geringe Apertur) und gleichzeitig jede Basisstation viele Endgeräte separat anstrahlt („massive MIMO“).

Es ist geplant, im städtischen Sektor etwa eine Basisstation alle 250 Meter (oder weniger) zu installieren, wobei hier auch noch zwischen sogenannten „small cells“ und gewöhnlichen Basisstationen unterschieden wird. Falls dies auch so umgesetzt würde, wäre möglicherweise ein beträchtlicher Anteil der für Insekten typischen Luftregion, in städtischen Bereichen, irgendwann mit Leistungen um 100 mW/m^2 gesättigt. Die Schweiz, Italien und ein paar osteuropäische Länder liegen mit 6 V/m Anlagengrenzwert im vermutlich unbedenklichen Bereich – aber sonst überall in Europa droht der 5G-Ausbau, zu einer deutlichen Zunahme der EMF-Immissionen zu führen. In Anbetracht der aktuellen Forschungslage muss der Autor dieses Reviews vor solch einem Vorgehen warnen, da schädliche Effekte auf Insekten unumgänglich wären. Zusätzlich ist 5G-Strahlung vermutlich – zumindest bei Insekten – bioaktiver als z. B. 4G-Emissionen der gleichen Feldstärke, wegen der sehr „dichten“ Signalcharakteristik (Panagopoulos 2011).

Die momentan verfügbaren Informationen und Einschätzungen zu 5G sind jedoch recht kontrovers und gegensätzlich und reichen von „völlig unproblematisch“ mit Verweis auf eine deutlich reduzierte Strahlenbelastung im Vergleich zur aktuellen Technologie (Chiaraviglio u. a. 2018; Matalatala u. a. 2018) – obschon rezente Messungen dies nicht oder nur eingeschränkt bestätigen (ANFR 2020; Ofcom 2020) – bis hin zu apokalyptischen Warnungen vor schwerwiegenden Auswirkungen (Kostoff u. a. 2020; Hardell und Nyberg 2017).

Schlussfolgerungen: Die Forschungslage zeigt, dass EMF einen ernstzunehmenden Einfluss auf die Vitalität von Insektenpopulationen haben könnten. 72 der 83 analysierten Studien fanden einen Effekt. Als negative Wirkungen wurden in Studien beschrieben: Einschränkungen des Orientierungssinns, reduzierte Fortpflanzungsfähigkeit und Fruchtbarkeit, Lethargie, Veränderungen der Flugdynamik, im Erfolg der Nahrungssuche, in Reaktionsgeschwindigkeiten, Fluchtverhalten, Störung der circadianen Rhythmik, Blockierung der Atmungskette und Schädigung der Mitochondrien, Fehlaktivierungen im Immunsystem, erhöhte Anzahl von DNA-Strangbrüchen. Einige Wirkmechanismen, die zu diesen Schädigungen führen, werden identifiziert. EMF beeinträchtigen den Stoffwechsel, u. a. wirken sie auf spannungsgesteuerte Calciumkanäle, z. B. in der neuronalen Erregungsübertragung und im Muskelgewebe, was zu einer Überaktivierung der Signaltransduktion und Atmungskette mit Produktion von freien Sauerstoffradikalen und in der Folge zu oxidativem Zellstress führen kann. Festgestellt wurde in einigen Experimenten, dass trotz geringen Belastungen durch Sendeanlagen nach mehreren Monaten schädliche Auswirkungen eintraten. Feldstärken bereits 100-fach unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte könnten schon Auswirkungen haben. Es könnte sein, dass schädliche Auswirkungen für Insekten bei Strahlungsintensitäten auftreten, die für Menschen unbedenklich sind – insbesondere in den höheren Frequenzbändern (siehe Abb. 13).

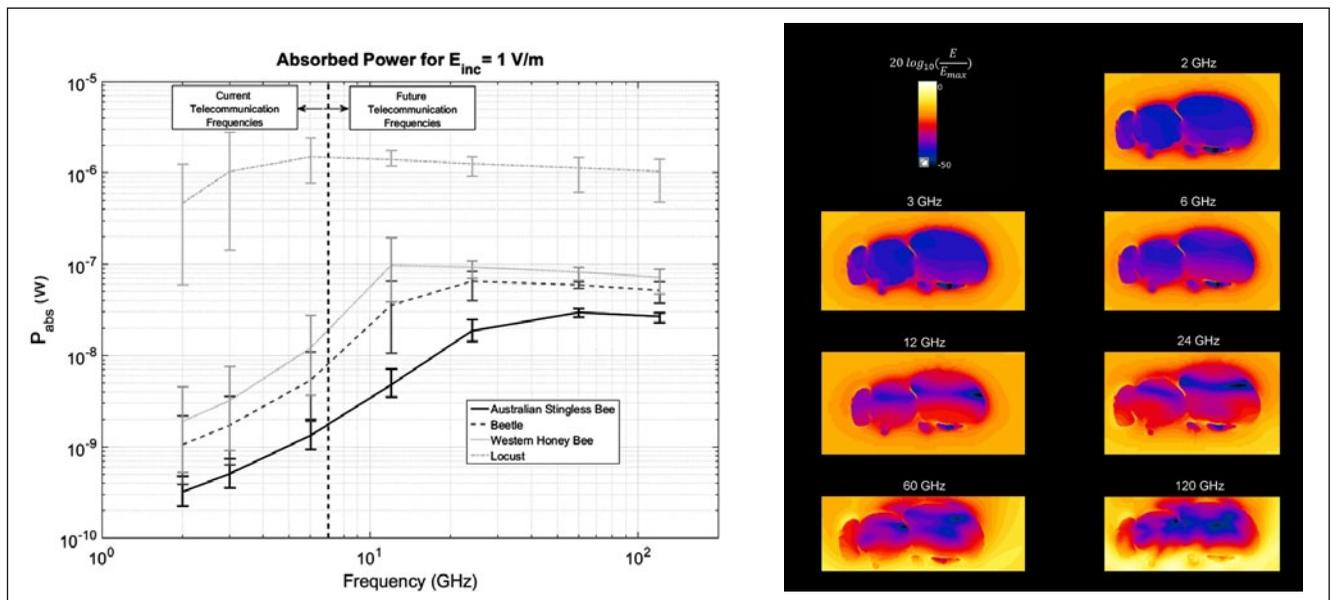


Abb. 13: Energieaufnahme bei Insekten bei steigenden Mikrowellenfrequenzen. Quelle: Thielens, Bell u. a. 2018.

Bis sich die Wahrheit herauskristallisiert hat, sollte die Entwicklung des Ausbaus genauestens beobachtet werden, und sofort mit toxikologischen Versuchen begonnen werden, um etwaige schädliche Auswirkungen schnell zu erkennen und zu quantifizieren, damit realistische schützende Richtlinien erlassen werden können. Vor dem Hintergrund des rapiden Rückgangs der Insekten und des weiteren Ausbaus hochfrequenter elektromagnetischer Feldquellen besteht nicht

nur weiterer, dringender Forschungsbedarf, insbesondere auch für die Wechselwirkungen mit anderen schädigenden Noxen wie Pestiziden. Bei der Planung des Mobilfunkausbaus müssen jetzt schon Lebensräume der Insekten vor EMF-Belastung geschützt werden. Dieser Autor beruft sich hierbei auf das sogenannte Vorsorge-Prinzip, das in Artikel 191 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union verankert ist.

5. Appendix

5.1 Liste der Abkürzungen

5G	Die fünfte Generation der Mobilfunktechnik
EEG	Elektroenzephalogramm
EMF	Elektromagnetische Felder
GHz	Gigahertz (1 GHz entspricht 1.000 MHz)
ICNIRP	Die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung
NMDA	N-Methyl-D-Aspartat-Rezeptor, ein ionotroper Glutamat-Rezeptor
MIMO	„multiple input multiple output“
RMS	„root mean square“, der quadratische Mittelwert
ROS	„reactive oxygen species“, freie Radikale
VGCC	„voltage-gated calcium channel“, spannungsgesteuerter Calciumkanal
W/m ²	Watt pro Quadratmeter, ein Maß für die abgestrahlte Leistungsdichte

5.2 Berechnungen

Die SI-Einheit zum Ausdrücken der Stärke eines elektromagnetischen Feldes ist Volt pro Meter [V/m], dies ist auch die allgemeine Messeinheit für elektrische Felder. Hieraus kann im Falle von elektromagnetischen Feldern die durchschnittliche (RMS) Leistungsdichte oder Strahlungsintensität in Watt pro Quadratmeter [W/m²] berechnet werden, die auch in der Solarzellentechnik Anwendung findet. Für alle hier einbezogenen Hochfrequenz-Studien wurden alle angegebenen Werte der Feldstärke in V/m umgerechnet, falls diese in einer anderen Einheit beschrieben waren.

Die folgenden Formeln wurden verwendet (Woelfle 2003; Poynting-Vector):

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \quad \text{oder auch:} \quad E = \sqrt{S \times Z_0}$$

mit E die elektrische Feldstärke [V/m]

S die Leistungsdichte [W/m²]

Z₀ die Wellenimpedanz [377 Ohm]

Bei elektromagnetischen Wellen ist die elektrische Feldstärke mit der magnetischen Feldstärke verknüpft, gemäß:

$$B = E/c$$

mit B das Magnetfeld in Tesla,

E das elektrische Feld in Volt pro Meter und

c die Lichtgeschwindigkeit (3×10^8 m/s)

(abgeleitet vom Ampère-Faraday-Gesetz, oder direkt vom Poynting-Vector)

Im Nahfeld, d. h. unterhalb einer Wellenlänge (z. B. < 30 cm bei GSM900), liegen das elektrische und magnetische Feld als Wirbelfeld vor. Über viele Messungen gemittelt bleibt die Proportionalität von elektrischer und magnetischer Feldstärke aber auch hier erhalten.

Der SAR-Wert, kurz für „Spezifische Absorptionsrate“, drückt aus wie viel Energie tatsächlich von bestrahltem Gewebe absorbiert wird und ist daher abhängig vom Gewebetyp (oder allgemein vom Material) und wurde hier geschätzt auf

$$SAR = \frac{(E \times 1,19)^2}{1.000} \text{ W/kg}$$

laut Panagopoulos, Johansson und Carlo 2013; Sagioglou u. a. 2014.

Interessenkonflikt: Der Autor erklärt, dass keine Interessenskonflikte bestehen.

Autor: Alain Thill, M.Sc.

Auftraggeber: Aktionsgruppe für Umwelttoxikologie Akut Luxemburg | Co-Finanzierung: Diagnose-Funk e.V., NaBu Baden-Württemberg

Zitierweise: Thill A (2020). Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Insekten. Beilage in umwelt · medizin · gesellschaft | 33 | 3/2020

Literatur

- Agmati LF u. a. (2018). „The brain as a ‚hypernetwork‘: the key role of neural networks as main producers of the integrated brain actions especially via the ‚broadcasted‘ neuro-connectomics“. In: *Journal of Neural Transmission* 125.6, S. 883–897.
- Altmann G und Warnke U (1976). „Der Stoffwechsel von Bienen (*Apis mellifica* L.) im 50-Hz-Hochspannungsfeld.“ In: *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*, 80(1-4), 267–271.
- Anfr (2020). 5G exposure measurements.: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/20200410-ANFR-rapport-mesures-pilotes-5G.pdf>
- ARIMMORA final report (2015). <https://cordis.europa.eu/project/rcn/99859/reporting/>
- Atlas D (2013). „The voltage-gated calcium channel functions as the molecular switch of synaptic transmission“. In: *Annual review of biochemistry* 82, S. 607–635.
- Bae JE u. a. (2016). „Positive geotactic behaviors induced by geomagnetic field in *Drosophila*“. In: *Mol Brain* 9.1, S. 55.
- Balmori A (2014). „Electrosmog and species conservation“. In: *Science of the Total Environment* 496, S. 314–316.
- Bandara P und Carpenter DO (2018). „Planetary electromagnetic pollution: it is time to assess its impact“. In: *The Lancet Planetary Health* 2.12, e512–e514.
- Bartos P u. a. (2019). „Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock“. In: *Journal of the Royal Society Interface* 16.158, S. 20190285.
- Belyaev I und Markov MS (2015). „Biophysical mechanisms for nonthermal microwave effects. Electromagnetic fields in biology und medicine.“
- Bindokas VP, Gauger JR und Greenberg B (1988). „Mechanism of biological effects observed in honey bees (*Apis mellifera*, L.) hived under extra-high-voltage transmission lines: Implications derived from bee exposure to simulated intense electric fields and shocks“. In: *Bioelectromagnetics* 9.3, S. 285–301.
- Bokil H u. a. (2001). „Ephaptic interactions in the mammalian olfactory system“. In: *Journal of Neuroscience* 21.20, RC173–RC173.
- Caddick SJ u. a. (1999). „Excitatory but not inhibitory synaptic transmission is reduced in lethargic (*Cacna4* lh) and tottering (*Cacna1a* tg) mouse thalami“. In: *Journal of neurophysiology* 81.5, S. 2066–2074.
- Cammaerts, Marie-Claire, Philippe De Doncker u. a. (2012). „GSM 900 MHz radiation inhibits ants‘ association between food sites and encountered cues“. en. In: *Electromagnetic biology and medicine* 31.2, S. 151–165.
- Cammaerts MC, De Doncker P u. a. (2012). „Ants can be used as bioindicators to reveal biological effects of electromagnetic waves from some wireless apparatus“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 33.4, S. 282–288.
- Cammaerts MC und Johansson O (2014). „Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electromagnetic radiation“. fr. In: *Electromagnetic Biology and Medicine* 32.3, S. 315–332.
- Catterall WA (2010). „Ion channel voltage sensors: structure, function and pathophysiology“. In: *Neuron* 67.6, S. 915–928.
- Chiang CC u. a. (2019). „Slow periodic activity in the longitudinal hippocampal slice can selfpropagate non-synaptically by a mechanism consistent with ephaptic coupling“. In: *The Journal of physiology* 597.1, S. 249–269.
- Chiaraviglio L u. a. (2018). „Planning 5G networks under EMF constraints: State of the art and vision“. In: *IEEE Access* 6, S. 51021–51037.
- Chou CK, Guy AW und Galambos R (1982). „Auditory perception of radiofrequency electromagnetic fields“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 71.6, S. 1321–1334.
- Clarke D u. a. (2013). „Detection and learning of floral electric fields by bumblebees“. In: *Science* 340.6128, S. 66–69.
- Clites BL und Pierce JT (2017). „Identifying cellular and molecular mechanisms for magnetosensation“. In: *Annual review of neuroscience* 40, S. 231–250.
- Cucurachi S u. a. (2013). „A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF)“. In: *Environment International* 51, S. 116–140.
- Damulewic, M und Mazzotta GM (2020). „One actor, multiple roles: the performances of CRYPTOCHROME in *Drosophila*“. In: *Frontiers in Physiology* 11.
- Erdoğan Y (2019). „Determination of the effect of electric fence system on productivity and behaviour of honeybees housed in different beehive types (*Apis mellifera* L.)“. In: *Italian Journal of Animal Science* 18.1, S. 941–948.
- Erdoğan Y und Cengiz MM (2019). „Effect of Electromagnetic Field (EMF) and Electric Field (EF) on Some Behavior of Honeybees (*Apis mellifera* L.)“. In: *bioRxiv*, S. 608182.
- Favre D (2011). „Mobile phone-induced honeybee worker piping“. In: *Apidologie* 42.3, S. 270–279. (2017). *Disturbing Honeybees‘ Behavior with Electromagnetic Waves: a Methodology.* <https://www.jsccimedcentral.com/Behavior/behavior-2-1010.php>
- Fedele G u. a. (2014). „Genetic analysis of circadian responses to low frequency electromagnetic fields in *Drosophila melanogaster*“. In: *PLoS genetics* 10.12, e1004804.
- Ferrari TE und Tautz J (2015). „Severe Honey Bee (*Apis mellifera*) Losses Correlate with Geomagnetic and Proton Disturbances in Earth’s Atmosphere“. In: *Journal of Astrobiology & Outreach*, S. 1–6.
- Fogle K J u. a. (2015). „CRYPTOCHROME-mediated phototransduction by modulation of the potassium ion channel b-subunit redox sensor“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.7, S. 2245–2250.
- Friesen M (2014). „Review of the literature on the biological effects of wireless radiation on insects: a call for more studies on honey bees – Abstract and references used for poster presentation.“
- funkstrahlung.ch (2017). *Grenzwerte.* <https://www.funkstrahlung.ch/index.php/politik/grenzwerte>
- Gee D u. a. (2013). „Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation“. In: *EEA Report No. 1*
- Gegear RJ u. a. (2008). „Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*“. In: *Nature* 454.7207, S. 1014.
- Georgiou CD (2010). „Oxidative stress-induced biological damage by low-level EMFs: mechanism of free radical pair electron spinpolarization and biochemical amplification“. In: *Non-thermal effects and mechanisms of interaction between electromagnetic fields and living matter.* Bologna (IT): Ramazzini institute, S. 63–113.
- Geronikolou S u. a. (2014). „Diverse radiofrequency sensitivity and cross-frequency effects of mobile or cordless phone near fields exposure in *Drosophila melanogaster*“. In: *PLoS one* 9.11, e112139.
- Goudeseune L, Balian E und Ventocilla J (2018). „The Impacts of Artificial Electromagnetic Radiation on Wildlife (Flora and Fauna)“. en. In: *Report of the web conference. A report of the EKLIPE project.*
- Greenberg B. u. a. (1981). „Response of honey bees, *Apis mellifera* L., to high-voltage transmission lines“. it. In: *Environ. Entomol* 10, S. 600–610.
- Guerra PA, Gegear RJ und Reppert SM (2014). „A magnetic compass aids monarch butterfly migration“. In: *Nature communications* 5.1, S. 1–8.
- Hales CG und Pockett S (2014). „The relationship between local field potentials (LFPs) and the electromagnetic fields that give rise to them“. In: *Frontiers in systems neuroscience* 8, S. 233.
- Halgamuge MN, See KY und Eberhardt JL (2015). „Reduced growth of soybean seedlings after exposure to weak microwave radiation from GSM 900 mobile phone and base station“. In: *Bioelectromagnetics* 36.2, S. 87–95.
- Halgamuge MN (2016). „Review: Weak radiofrequency radiation exposure from mobile phone radiation on plants“. fr. In: *Electromagnetic Biology and Medicine* 36.2, S. 213–235.
- Hallmann CA u. a. (2017). „More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas“. In: *PLoS one* 12.10, e0185809.
- Han KS u. a. (2018). „Ephaptic coupling promotes synchronous firing of cerebellar purkinje cells“. In: *Neuron* 100.3, S. 564–578.
- Hardell L und Nyberg R (2017). *5G-Appeal.* <https://www.5gappeal.eu/>
- Hinrikus H u. a. (2017). „Mechanism of low-level microwave radiation effect on nervous system“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 36.2, S. 202–212.

- Hoofwijk H und Blacquièr T u.a. (2013). „Mobiële telefonie en de ontwikkeling van honingbijen.“ https://www.researchgate.net/publication/283417814-Mobiële_telefonie_en_de_ontwikkeling_van_honingbijen/
- Hsu CY u.a. (2007). „Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*)“. In: *PLoS one* 2.4, e395.
- Kim JH u.a. (Feb. 2019). „Decreased dopamine in striatum and difficult locomotor recovery from MPTP insult after exposure to radiofrequency electromagnetic fields. Ju Hwan Kim, Choong-Hyun Lee, Hyung-Gun Kim“. en. In: Hak Rim Kim. *Sci Rep* 9.1. Published online 2019 Feb 4., S. 1201.
- Korall H, Leucht T und Martin H (1988). „Bursts of magnetic fields induce jumps of misdirection in bees by a mechanism of magnetic resonance“. In: *Journal of Comparative Physiology A* 162.3, S. 279–284.
- Kostoff RN u.a. (2020). „Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions“. In: *Toxicology Letters* 323, S. 35–40.
- Krylov VV (Okt. 2017). „Biological effects related to geomagnetic activity and possible mechanisms“. In: *Bioelectromagnetics* 38.7, S. 497–510.
- Kumar NR (2012). „Influence of cell phone radiations on *Apis mellifera* semen“. In: *Journal of Global Bioscience* 1, S. 17–19.
- Kumar NR, Rana N und Kalia P (2013). „Biochemical changes in haemolymph of *Apis mellifera* L. drone under the influence of cell phone radiations“. In: *Journal of applied and Natural Science* 5.1, S. 139–141.
- Kumar NR, Sangwan S und Badotra P (2011). „Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey bees“. In: *Toxicology international* 18.1, S. 70.
- Lai H und Singh NP (2005). „Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on single and double DNA strand breaks in rat brain cells“. In: *Electromagnetic Biology and Medicine* 24.1, S. 23–29.
- Lai H (2004). „Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on spatial learning in the rat“. In: *Physiology & behavior* 82.5, S. 785–789.
- Lambinet V u.a. (2017). „Honey bees possess a polarity-sensitive magnetoreceptor“. In: *Journal of Comparative Physiology A* 203.12, S. 1029–1036.
- Lázaro A u.a. (2016). „Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators“. In: *Journal of insect conservation* 20.2, S. 315–324.
- Liang CH. u.a. (2016). „Magnetic sensing through the abdomen of the honey bee“. en. In: *Sci. Rep* 6, S. 23657.
- Litovitz TA u.a. (1994). „Temporally incoherent magnetic fields mitigate the response of biological systems to temporally coherent magnetic fields“. In: *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association* 15.5, S. 399–409.
- Littleton JT und Ganetzký B (2000). „Ion channels and synaptic organization: analysis of the *Drosophila* genome“. In: *Neuron* 26.1, S. 35–43.
- Lopatina NG u.a. (2019). „Effect of Non-Ionizing Electromagnetic Radiation on Behavior of the Honeybee, *Apis mellifera* L.(Hymenoptera, Apidae)“. In: *Entomological Review* 99.1, S. 24–29.
- Makarov VI und Khmelinskii I (2016). „External control of the *Drosophila* melanogaster egg to imago development period by specific combinations of 3D low-frequency electric and magnetic fields“. en. In: *Electromagn Biol Med* 35.1, S. 15–29.
- Maliszewska J u.a. (2018). „Electromagnetic field exposure (50 Hz) impairs response to noxious heat in American cockroach“. In: *Journal of Comparative Physiology A* 204.6, S. 605–611.
- Malkemper EP. u.a. (2018). „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.“
- Manta AK u.a. (Apr. 2017). „Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster*“. In: *Fly* 11.2, S. 75–95.
- Margaritis LH u.a. (2014). „*Drosophila* oogenesis as a biomarker responding to EMF sources“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 33.3, S. 165–189.
- Markov MS (2007). „Expanding use of pulsed electromagnetic field therapies“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 26.3, S. 257–274.
- Martinez-Banaclocha M (2020). „Astroglial Isopotentiality and Calcium-Associated Biomagnetic Field Effects on Cortical Neuronal Coupling“. In: *Cells* 9.2, S. 439.
- Matalatala M u.a. (2018). „Optimal low-power design of a multicell multiuser massive MIMO system at 3.7 GHz for 5G wireless networks“. In: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018.
- Miyani HV (2014). „Effect of electromagnetic waves on the performance of *Apis mellifera* L.“ Magisterarb. Dr Yashwant Singh Parmar University of Horticulture und Forestry.
- Mohammed HS u.a. (2013). „Non-thermal continuous and modulated electromagnetic radiation fields effects on sleep EEG of rats“. In: *Journal of advanced research* 4.2, S. 181–187.
- Non-Ionizing Radiation Protection, International Commission on u.a. (2020). „Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)“. In: *Health Physics* 118.5, S. 483–524.
- Nordmann GC, Hochstoeger T und Keays DA (2017). „Unsolved mysteries: Magnetoreception – A sense without a receptor“. In: *PLoS biology* 15.10, e2003234.
- Odemer R und Odemer F (2019). „Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success“. In: *Science of The Total Environment* 661, S. 553–562.
- Ofcom (2020). 5G exposure measurements. https://www.ofcom.org.uk/___data/assets/pdf_file/0015/190005/emf-test-summary.pdf
- Oliveira JF de u.a. (2010). „Ant antennae: are they sites for magnetoreception?“. In: *Journal of The Royal Society Interface* 7.42, S. 143–152.
- Pall ML (2013). „Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects“. In: *Journal of Cellular and Molecular Medicine* 17, S. 958.
- (2016). „Electromagnetic fields act similarly in plants as in animals: Probable activation of calcium channels via their voltage sensor“. In: *Current Chemical Biology* 10.1, S. 74–82.
- Panagopoulos DJ (2011). „Analyzing the health impacts of modern telecommunications microwaves“. In: *Advances in medicine and biology* 17, S. 1–54.
- (2012). „Effect of microwave exposure on the ovarian development of *Drosophila melanogaster*“. In: *Cell Biochemistry and Biophysics* 63.2, S. 121–132.
- (2017). „Mobile Telephony EMFs Effects on Insect Ovarian Cells. The Necessity for Real Exposures Bioactivity Assessment. The Key Role of Polarization, and the ‚Ion Forced-Oscillation Mechanism““. In: *Microwave Effects on DNA and Proteins*. Springer, S. 1–48.
- (2019). „Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of manmade electromagnetic fields“. In: *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. Panagopoulos, Dimitris J, Marie-Claire Cammaerts u.a. (2016). „Comments on environmental impact of radiofrequency fields from mobile phone base stations“. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46.9, S. 885–903. eprint: <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1182107>
- Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Karabarbounis A u.a. (2007). „Comparison of bioactivity between GSM 900 MHz and DCS 1.800 MHz mobile telephony radiation“. In: *Electromagnetic Biology and Medicine* 26.1, S. 33–44.
- Panagopoulos DJ, Chavdoula ED und Margaritis LH (2010). „Bioeffects of mobile telephony radiation in relation to its intensity or distance from the antenna“. In: *International journal of radiation biology* 86.5, S. 345–357.
- Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP u.a. (2007). „Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1.800-MHz mobile telephony radiation“. In: *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 626.1-2, S. 69–78.
- Panagopoulos DJ, Johansson O und Carlo GL (2013). „Evaluation of specific absorption rate as a dosimetric quantity for electromagnetic fields bioeffects“. In: *PLoS one* 8.6.
- (2015a). „Polarization: a key difference between manmade and natural electromagnetic fields, in regard to biological activity“. In: *Scientific reports* 5, S. 14914.
- (2015b). „Real versus simulated mobile phone exposures in experimental studies“. In: *Bio-Med research international* 2015.
- Panagopoulos DJ, Karabarbounis A und Margaritis LH (2002). „Mechanism for action of electromagnetic fields on cells“. In: *Biochemical and biophysical research communications* 298.1, S. 95–102.
- (2004). „Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster*“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 23.1, S. 29–43.

- Panagopoulos DJ, Karabarbounis A und Lioliousis C (2013). „ELF alternating magnetic field decreases reproduction by DNA damage induction“. en. In: *Cell Biochemistry and Biophysics* 67.2, S. 703–716.
- Panagopoulos DJ und Margaritis LH (2010). „The identification of an intensity ‚window‘ on the bioeffects of mobile telephony radiation“. In: *International Journal of Radiation Biology* 86.5, S. 358–366. eprint: <https://doi.org/10.3109/09553000903567979>
- Pilla AA (2006). „Mechanisms and therapeutic applications of time varying and static magnetic fields“. In: *Biological and medical aspects of electromagnetic fields*, S. 351–411.
- (2012). „Electromagnetic fields instantaneously modulate nitric oxide signaling in challenged biological systems“. In: *Biochemical and biophysical research communications* 426.3, S. 330–333.
- (2013). „Nonthermal electromagnetic fields: from first messenger to therapeutic applications“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 32.2, S. 123–136.
- Potts SG u. a. (2016). „The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production“. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity und Ecosystem Services, Bonn, Germany, S. 552.
- Poynting-Vector (o.D.). https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_poynting_vector.htm.
- Qin S u. a. (2016). „A magnetic protein biocompass“. In: *Nature materials* 15.2, S. 217.
- Ramirez E u. a. (1983). „Oviposition and development of *Drosophila* modified by magnetic fields“. In: *Bioelectromagnetics* 4.4, S. 315–326.
- Redlarski G u. a. (2015). „The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes“. In: *BioMed research international*.
- Rhind SM (2009). „Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability?“ In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1534, S. 3391–3401.
- Ritz T u. a. (2004). „Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass“. In: *Nature* 429.6988, S. 177.
- Sagioglou NE u. a. (2014). „Apoptotic cell death during *Drosophila* oogenesis is differentially increased by electromagnetic radiation depending on modulation, intensity and duration of exposure“. In: *Electromagnetic biology and medicine* 35.1, S. 40–53.
- Salford LG u. a. (2008). „The mammalian brain in the electromagnetic fields designed by man with special reference to blood-brain barrier function, neuronal damage and possible physical mechanisms“. In: *Progress of Theoretical Physics Supplement* 173, S. 283–309.
- Saliev T u. a. (2019). „Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin“. In: *Progress in biophysics and molecular biology* 141, S. 25–36.
- Sánchez-Bayo F und Wyckhuys KAG (2019). „Worldwide decline of the entomo-fauna: A review of its drivers“. In: *Biological Conservation* 232, S. 8–27.
- Sharma A u. a. (2016). „Heavy metal pollution: A global pollutant of rising concern“. In *Toxicity and waste management using bioremediation*. IGI Global, S. 1–26.
- Shaw J u. a. (2015). „Magnetic particle-mediated magnetoreception“. In: *Journal of the Royal Society Interface* 12.110, S. 20150499.
- Shepherd S u. a. (2018). „Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees“. In: *Scientific reports* 8.1, S. 7932.
- Shepherd S u. a. (2019). „Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields“. In: *PLoS one* 14.10.
- Shepherd S (2018). „The effects of extremely low frequency electromagnetic fields on insects“. Diss. University of Southampton.
- Sherrard RM u. a. (2018). „Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species“. In: *PLoS biology* 16.10.
- Singh A u. a. (2020). „A novel pilot study of automatic identification of EMF radiation effect on brain using computer vision and machine learning“. In: *Biomedical Signal Processing and Control* 57, S. 101821.
- Solov'yov I und Schulten K (2014). *Cryptochrome and Magnetic Sensing*. <http://www.ks.uiuc.edu/Research/cryptochrome/>
- Stever H und Kimmel S u. a. (2006). „Verhaltensänderung der Honigbiene *Apis mellifera* unter elektromagnetischer Exposition.“ http://www.bienenarchiv.de/forschung/2006/elmagexp_bienen_06.pdf
- Stever H, Kuhn J u. a. (2006). „Verhaltensänderung unter elektromagnetischer Exposition – Pilotstudie 2005.“ https://www.researchgate.net/publication/235672066_Hermann_Stever_Jochen_Kuhn_Christoph_Otten_Bernd_Wunder_Wolfgang_Harst_2006_Verhaltensänderungunter_elektromagnetischer_Exposition_Pilotstudie_2005
- Sun ZC u. a. (2016). „Extremely low frequency electromagnetic fields facilitate vesicle endocytosis by increasing presynaptic calcium channel expression at a central synapse“. In: *Scientific reports* 6, S. 21774.
- Sutton GP u. a. (2016). „Mechanosensory hairs in bumble bees (*Bombus terrestris*) detect weak electric fields“. en. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113.26, S. 7261–7265.
- Taye RR u. a. (2017). „Effect of electromagnetic radiation of cell phone tower on foraging behaviour of Asiatic honey bee, *Apis cerana* F. (Hymenoptera: Apidae).“ <http://www.entomoljournal.com/archives/2017/vol5issue3/PartU/5-3-142-590.pdf>
- Thielens A, Duncan B u. a. (2018). „Exposure of Insects to Radio-Frequency Electromagnetic Fields from 2 to 120 GHz“. In: *Scientific reports* 8.1, S. 3924.
- Thielens A, Greco MK u. a. (2020). „Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees“. In: *Scientific reports* 10.1, S. 461.
- Thors B u. a. (2017). „Time-averaged realistic maximum power levels for the assessment of radio frequency exposure for 5G radio base stations using massive MIMO“. In: *IEEE Access* 5, S. 19711–19719.
- Todorovic D u. a. (2019). „Long-term exposure of cockroach *Blattella germanica* (Insecta: Blattellidae) nymphs to magnetic fields of different characteristics: effects on antioxidant biomarkers and nymphal gut mass“. In: *International journal of radiation biology*, S. 1–9.
- Vacha M, Puzova T und Kvicilova M (2009). „Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach“. en. In: *J Exp Biol* 212.Pt 21, S. 3473–7.
- Valko M u. a. (2007). „Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease“. In: *The international journal of biochemistry & cell biology* 39.1, S. 44–84.
- Vanbergen AJ u. a. (2019). „Risk to pollinators from anthropogenic electromagnetic radiation (EMR): evidence and knowledge gaps“. In: *Science of the Total Environment* 695, S. 133833.
- Vilic M u. a. (2017). „Effects of short-term exposure to mobile phone radiofrequency (900 MHz) on the oxidative response and genotoxicity in honey bee larvae“. In: *Journal of apicultural research* 56.4, S. 430–438.
- Wan G, Zhao Z und Xu J (2014). „Bio-effects of near-zero magnetic fields on the growth, development and reproduction of small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* and brown planthopper, *Nilaparvata lugens*“. en. In: *Journal of Insect Physiology* 68, S. 7–15.
- Wan G u. a. (2019). „Geomagnetic field absence reduces adult body weight of a migratory insect by disrupting feeding behavior and appetite regulation“. In: *bioRxiv*, S. 737361.
- Warnke U (2009). „Ein initialer Mechanismus zu Schädigungseffekten durch Magnetfelder bei gleichzeitig einwirkender Hochfrequenz des Mobil- und Kommunikationsfunks. umwelt · medizin · gesellschaft 3 (in press)“. In: *umwelt · medizin · gesellschaft* 22.3, S. 219–238.
- Weinberg SH (2017). „Ephaptic coupling rescues conduction failure in weakly coupled cardiac tissue with voltage-gated gap junctions“. In: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 27.9, S. 093908.
- Wellenstein G (1973). „Der Einfluss von Hochspannungsleitungen auf Bienen-völker (*Apis mellifica* L.)“ In: *Journal of Applied Entomology* 74.1–4, S. 86–94.
- Woelfle R (2003). *Grenzwerte*. http://www.raif-woelfle.de/elektromog/allgemein/recht_a.htm
- Wyszkowska J u. a. (2016). „Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behaviour, physiology and stress protein levels of desert locusts“. In: *Scientific reports* 6, S. 36413.
- Xu B u. a. (2017). „Power density measurements at 15 GHz for RF EMF compliance assessments of 5G user equipment“. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65.12, S. 6584–6595.
- Zhang ZY u. a. (2016). „Coupling mechanism of electromagnetic field and thermal stress on *Drosophila melanogaster*“. In: *PLoS one* 11.9, e0162675.
- Zhang Y u. a. (2019). „Asymmetric ephaptic inhibition between compartmentalized olfactory receptor neurons“. In: *Nature communications* 10.1, S. 1–16.

Tabellen

V/m	mW/m ²	nT	SAR [W/kg]
0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.03	0.33	0.00
0.20	0.11	0.67	0.00
0.30	0.24	1.00	0.00
0.40	0.42	1.33	0.00
0.50	0.66	1.67	0.00
0.60	0.95	2.00	0.00
0.70	1.30	2.33	0.00
0.80	1.70	2.67	0.00
0.90	2.15	3.00	0.00
1.00	2.65	3.34	0.00
1.20	3.82	4.00	0.00
1.40	5.20	4.67	0.00
1.60	6.79	5.34	0.00
1.80	8.59	6.00	0.00
2.00	10.61	6.67	0.01
2.20	12.84	7.34	0.01
2.40	15.28	8.01	0.01
2.70	19.34	9.01	0.01
3.00	23.87	10.01	0.01
4.00	42.44	13.34	0.02
5.00	66.31	16.68	0.04
6.00	95.49	20.01	0.05
7.00	129.97	23.35	0.07
8.00	169.76	26.68	0.09
9.00	214.85	30.02	0.11
10.00	265.25	33.36	0.14
15.00	596.82	50.03	0.32
20.00	1061.01	66.71	0.57
25.00	1657.82	83.39	0.89
30.00	2387.27	100.07	1.27
35.00	3249.34	116.74	1.73
40.00	4244.03	133.42	2.27
45.00	5371.35	150.10	2.87
50.00	6631.30	166.78	3.54
55.00	8023.87	183.46	4.28
60.00	9549.07	200.13	5.10
70.00	12997.35	233.49	6.94
80.00	16976.13	266.84	9.06
90.00	21485.41	300.20	11.47
100.00	26525.20	333.56	14.16

Tab. 1: Umrechnungen hochfrequenter EMF-Feldstärken

Autor	Jahr	Insekten	Feldquelle	Titel
Wyszkowska	2019	Honigbiene	Helmholtz-Spule	Electromagnetic fields and colony collapse disorder of the honeybee.
Todorovic	2019	Schabe	Helmholtz-Spule	Long-term exposure of cockroach <i>Blattella germanica</i> (Insecta: Blattellidae) nymphs ...
Shepherd	2019	Honigbiene	Helmholtz-Spule	Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to ...
Panagopoulos	2019	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-...
Erdoğan	2019	Honigbiene	Elektrozaun	Determination of the effect of electric fence system on productivity and behav...
Erdoğan	2019	Honigbiene	Helmholtz-Spule	Effect of Electromagnetic Field (EMF) and Electric Field (EF) on Some Behavio...
Sherrard	2018	<i>Drosophila</i>	PEMF	Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate in...
Shepherd	2018	Honigbiene	Helmholtz-Spule	Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor...
Shepherd	2018	Honigbiene	Helmholtz-Spule	The effects of extremely low frequency electromagnetic fields on insects...
Maliszewska	2018	Schabe	Helmholtz-Spule	Electromagnetic field exposure (50 Hz) impairs response to noxious heat in ...
Zmejkoski	2016	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Different responses of <i>Drosophila subobscura</i> isofemale lines to extremely low...
Zhang	2016	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Coupling mechanism of electromagnetic field and thermal stress on <i>Drosophila</i> ...
Zagirnyak	2016	<i>Drosophila</i>	Elektromotor	Experimental research of electromechanical and biological systems compatibility...
Wyszkowska	2016	Heuschrecke	Helmholtz-Spule	Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behavio...
Makarov	2016	<i>Drosophila</i>	3d-LF EMF cell	External control of the <i>Drosophila melanogaster</i> egg to imago development peri...
Todorovic	2015	Kafer	Helmholtz-Spule	Effects of two different waveforms of ELF MF on bioelectrical activity of ant...
Patenkovic	2015	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	The impact of extremely low frequency electromagnetic field (50 Hz, 0.25 mT) ...
Jankowska	2015	Schabe	Helmholtz-Spule	Exposure to 50 Hz electromagnetic field changes the efficiency of the scorpion...
Fedele	2014	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Genetic analysis of circadian responses to low frequency electromagnetic field...
Li	2013	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Gene expression and reproductive abilities of male <i>Drosophila melanogaster</i> ...
Dimitrijevic	2013	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Temporal pattern of <i>Drosophila subobscura</i> locomotor activity after exposure ...
Tipping	1999	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Observations on the effects of low frequency electromagnetic fields on cellul...
Korall	1988	Honigbiene	Helmholtz-Spule	Bursts of magnetic fields induce jumps of misdirection in bees by a mechanism...
Bindokas	1988	Honigbiene	765 kV	Mechanism of biological effects observed in honey bees (<i>Apis mellifera</i> , L.) h...
Walters	1987	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Test for the effects of 60-Hz magnetic fields on fecundity and development in...
Altmann	1987	Honigbiene	2 kV-Leitung	Thermographie der Honigbienen-Wintertraube unter Einfluss von Hochspannung...
Ramirez	1983	<i>Drosophila</i>	Helmholtz-Spule	Oviposition and development of <i>Drosophila</i> modified by magnetic fields...
Greenberg	1981	Honigbiene	765 kV	Response of honey bees, <i>Apis mellifera</i> L., to high-voltage transmission lines...
Wellenstein	1973	Honigbiene	220 kV	Der Einfluss von Hochspannungsleitungen auf Bienenvölker (<i>Apis mellifica</i> L...

Tab. 2: Liste der Niederfrequenzstudien (LF)

Autor	Jahr	Insekten	Feldquelle	Titel
Thielens	2020	Honigbiene	Simulation	Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees...
Singh	2020	<i>Drosophila</i>	Signalgenerator	A novel pilot study of automatic identification of EMF radiation effect on ...
Panagopoulos	2019	<i>Drosophila</i>	GSM-Handy	Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-...
Odemer	2019	Honigbiene	GSM-Handy	Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee ...
Lopatina	2019	Honigbiene	Wi-Fi router	Effect of Non-Ionizing Electromagnetic Radiation on Behavior of the Honeybee ...
Jungwirth	2019	Honigbiene	Signalgenerator	The Effect of Electromagnetic Fields Produced by WiFi Routers on the Magnetite ...
Bartos	2019	Schabe	Signalgenerator	Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock...
Zubrzak	2018	Honigbiene	Signalgenerator	Thermal and acoustic changes in bee colony due to exposure to microwave ...
Thielens	2018	verschiedene	Simulation	Exposure of Insects to Radio-Frequency Electromagnetic Fields from 2 to 120 GHz...
Mikhaylova	2018	Fliegen	Signalgenerator	Determining the electromagnetic field parameters to kill flies at livestock ...
Vilic	2017	Honigbiene	Signalgenerator	Effects of short-term exposure to mobile phone radiofrequency (900 MHz) on ...
Vargova	2017	Zecke	Signalgenerator	Ticks and radio-frequency signals: behavioural response of ticks ...

Taye	2017	Honigbiene	GSM-Turm	Effect of electromagnetic radiation of cell phone tower on foraging behaviour...
Syalima	2017	Schabe	GSM-Handy	Mobile phone radiation induces sedation in <i>Periplaneta americana</i> ...
Poh	2017	Moskito	Signalgenerator	Effects of low-powered RF sweep between 0.01-20 GHz on female <i>Aedes Aegypti</i> ...
Manta	2017	Drosophila	GSM-Handy	Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, ...
Favre	2017	Honigbiene	GSM-Turm	Disturbing Honeybees' Behavior with Electromagnetic Waves: a Methodology...
Lazaro	2016	verschiedene	GSM-Turm	Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the ...
Fauzi	2016	Drosophila	GSM-Handy	The Effect of EMF Radiation Emitted by Mobile Phone to Insect Population ...
Dyka	2016	Drosophila	Signalgenerator	Effects of 36.6 GHz and static magnetic field on degree of endoreduplication ...
Darney	2016	Honigbiene	Signalgenerator	Effect of high-frequency radiations on survival of the honeybee (<i>Apis mellifera</i> ...
Patel	2015	Honigbiene	GSM-Turm	Impact of electromagnetic radiations on biology and behaviour of <i>Apis mellifera</i> ...
Dalio	2015	Honigbiene	GSM-Handy	Effect of Electromagnetic (cell phone) radiations on <i>Apis mellifera</i> ...
Sagioglou	2014	Drosophila	Signalgenerator	Apoptotic cell death during <i>Drosophila</i> oogenesis is differentially increased ...
Miyani	2014	Honigbiene	GSM-Turm	Effect of electromagnetic waves on the performance of <i>Apis mellifera</i> ...
Margaritis	2014	Drosophila	Wi-Fi router	<i>Drosophila</i> oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources...
Manta	2014	Drosophila	DECT	Reactive oxygen species elevation and recovery in <i>Drosophila</i> bodies and ovaries...
Mall	2014	Honigbiene	GSM-Turm	Effect of electromagnetic radiations on brooding, honey production and foraging...
Geronikolou	2014	Drosophila	DECT	Diverse radiofrequency sensitivity and radiofrequency effects of mobile or ...
El Halabi	2014	Honigbiene	GSM-Turm	The effect of cell phone antennas' radiations on the life cycle of honeybees.
Cammaerts	2014	Ameise	Signalgenerator	Ants can be used as bio-indicators to reveal biological effects of electromag...
Cammaerts	2014	Ameise	Signalgenerator	Effect of Short-Term GSM Radiation at Representative Levels in Society on a B...
Vijver	2013	verschiedene	GSM-Turm	Investigating short-term exposure to electromagnetic fields on reproductive ...
Kumar	2013	Honigbiene	GSM-Handy	Biochemical changes in haemolymph of <i>Apis mellifera</i> L. drone under the influence ...
Hoofwijk	2013	Honigbiene	GSM-Turm	Mobiele telefonie en de ontwikkeling van honingbijen.
El Halabi	2013	Honigbiene	GSM-Handy	The effect of cell phone radiations on the life cycle of honeybees.
Cammaerts	2013	Ameise	Wi-Fi router	Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electro-...
Panagopoulos	2012	Drosophila	GSM-Handy	Effect of microwave exposure on the ovarian development of <i>Drosophila</i> ...
Kumar	2012	Honigbiene	GSM-Handy	Influence of cell phone radiations on <i>Apis mellifera</i> semen.
El Kholly	2012	Drosophila	GSM-Handy	Effect of 60 minutes exposure to electromagnetic field on fecundity, learning...
Cammaerts	2012	Ameise	Signalgenerator	GSM 900 MHz radiation inhibits ants association between food ...
Sahib	2011	Honigbiene	GSM-Handy	Impact of mobile phones on the density of honeybees.
Kumar	2011	Honigbiene	GSM-Handy	Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey ...
Favre	2011	Honigbiene	GSM-Handy	Mobile phone-induced honeybee worker piping.
Sharma	2010	Honigbiene	GSM-Handy	Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone ...
Panagopoulos	2010	Drosophila	GSM-Handy	Bioeffects of mobile telephony radiation in relation to its intensity or distance...
Chavdoula	2010	Drosophila	GSM-Handy	Comparison of biological effects between continuous and intermittent exposure...
Lee	2008	Drosophila	Signalgenerator	Mobile phone electromagnetic radiation activates MAPK signaling and regulates...
Panagopoulos	2007	Drosophila	GSM-Handy	Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation...
Steuer	2006	Honigbiene	DECT	Verhaltensänderung der Honigbiene <i>Apis mellifera</i> unter elektromagnetischer ...
Atli	2006	Drosophila	Signalgenerator	The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development ...
Steuer	2005	Honigbiene	DECT	Verhaltensänderung unter elektromagnetischer Exposition–Pilotstudie 2005...
Panagopoulos	2004	Drosophila	GSM-Handy	Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of ...
Weisbrot	2003	Drosophila	GSM-Handy	Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in <i>Drosophila</i> ...
Westerdahl	1981	Honigbiene	Signalgenerator	Flight, orientation, and homing abilities of honeybees following exposure to ...
Westerdahl	1981	Honigbiene	Signalgenerator	Longevity and food consumption of microwave-treated (2.45 GHz CW) honeybees ...
Carpenter	1971	Kaefer	Signalgenerator	Evidence for nonthermal effects of microwave radiation: Abnormal development ...

Tab. 3: Liste der Hochfrequenzstudien (HF)

Autor	Jahr	Titel
Stoll	2019	Method and device for influencing insects.
Sadeghi	2019	Microwave Application for Controlling <i>Oryzaephilus surinamensis</i> Insects Infes...
Rosi	2019	Emigration Effects Induced by Radio Frequency Treatment to Dates Infested by ...
Souza	2018	Low-cost electronic tagging system for bee monitoring.
Benedetti	2017	Device and respective control method for controlling the activities of a colo...
Panagopoulos	2013	ELF alternating magnetic field decreases reproduction by DNA damage induction...
Schneider	2012	RFID tracking of sublethal effects of two neonicotinoid insecticides on the f...
Al Ghamdi	2012	The effect of static electric fields on <i>Drosophila</i> behaviour.
Tirkel	2011	Effects of Millimetre Wave Exposure on Termite Behavior.
Swedberg	2011	Rfid helps scientists study honeybees' homing behavior.
Schick-Borken	2011	Schülerstudie zur Einwirkung von Wlan Strahlung auf die Entwicklung von Mehl...
Pinpathomrat	2011	Inhibition of <i>Culex quinquefasciatus</i> (Diptera: Culicidae) viability by nanosec...
Hausmann	2011	Auswirkung von Mobilfunkstrahlung auf Hautflügler (Hymenoptera) und Käfer (...)
Panagopoulos	2010	The identification of an intensity window on the bioeffects of mobile telephony...
Panagopoulos	2010	The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony...
Panagopoulos	2008	Mobile telephony radiation effects on living organisms.
Kimmel	2007	Effects of electromagnetic exposition on the behavior of the honeybee (<i>Apis m...</i>
Harst	2007	Can Electromagnetic Exposure Cause a Change in Behaviour? Studying Possible N...
Pan	2004	Apparent biological effect of strong magnetic field on mosquito egg hatching...
Webber	1946	High-frequency electric fields as lethal agents for insects.
Headlee	1931	The differential between the effect of radio waves on insects and on plants...

Tab. 4: Liste ausgeschlossener Studien (qualitativ schlecht, irrelevant oder Doppelpublikationen)

Autor	Jahr	Titel
Wan	2019	Geomagnetic field absence reduces adult body weight of a migratory insect by ...
Landler	2018	Cryptochrome: The magnetosensor with a sinister side?
Kong	2018	In-vivo biomagnetic characterisation of the American cockroach
Zhang	2017	Molecular Mechanisms for Electromagnetic Field Biosensing
Nordmann	2017	Unsolved mysteries: Magnetoreception – A sense without a receptor
Lambinet	2017	Honey bees possess a polarity-sensitive magnetoreceptor
Krylov	2017	Biological effects related to geomagnetic activity and possible mechanisms
Clites	2017	Identifying cellular and molecular mechanisms for magnetosensation
Clarke	2017	The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial elec...
Wu	2016	Magnetoreception Regulates Male Courtship Activity in Drosophila
Sutton	2016	Mechanosensory hairs in bumble bees (<i>Bombus terrestris</i>) detect weak electric ...
Qin	2016	A magnetic protein biocompass
Liang	2016	Magnetic sensing through the abdomen of the honey bee
Bae	2016	Positive geotactic behaviors induced by geomagnetic field in Drosophila
Wan	2015	Cryptochromes and Hormone Signal Transduction under Near-Zero Magnetic Fields...
Spasic	2015	Effects of the static and ELF magnetic fields on the neuronal population acti...
Shaw	2015	Magnetic particle-mediated magnetoreception
Ferrari	2015	Severe Honey Bee (<i>Apis mellifera</i>) Losses Correlate with Geomagnetic and Proto...
Wan	2014	Bio-effects of near-zero magnetic fields on the growth, development and repro...
Solovyov	2014	Cryptochrome and Magnetic Sensing
Guerra	2014	A magnetic compass aids monarch butterfly migration
Greggers	2013	Reception and learning of electric fields in bees
Clarke	2013	Detection and learning of floral electric fields by bumblebees
Begall	2013	Magnetic alignment in mammals and other animals
Winklhofer	2010	Magnetoreception
Wajnberg	2010	Magnetoreception in eusocial insects: an update
Oliveira	2010	Ant antennae: are they sites for magnetoreception?
Liedvogel	2010	Cryptochromes—a potential magnetoreceptor: what do we know and what do we w...
Yoshii	2009	Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity of Drosophila's circ...
Vacha	2009	Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroac...
Knight	2009	Cockroaches use radical pair mechanism to detect magnetism
Gegear	2008	Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in Drosophila
Hsu	2007	Magnetoreception System in Honeybees (<i>Apis mellifera</i>)
Kirschvink	1997	Measurement of the threshold sensitivity of honeybees to weak, extremely low-...
Kirschvink	1996	Microwave absorption by magnetite
Frier	1996	Magnetic compass cues and visual pattern learning in honeybees
Hsu	1994	Magnetoreception in honeybees
Kirschvink	1991	Is geomagnetic sensitivity real? Replication of the Walker-Bitterman magnetic...
Walker	1989	Short Communication: Honeybees can be Trained to Respond to very Small Change...
Kirschvink	1981	The horizontal magnetic dance of the honeybee is compatible with a single-dom...
Gould	1980	Orientation of demagnetized bees
Gould	1978	Bees have magnetic remanence
Becker	1964	Reaktion von Insekten auf Magnetfelder, elektrische Felder und atmosphärische
Schneider	1963	Systematische Variationen in der elektrischen, magnetischen und geographisch-...

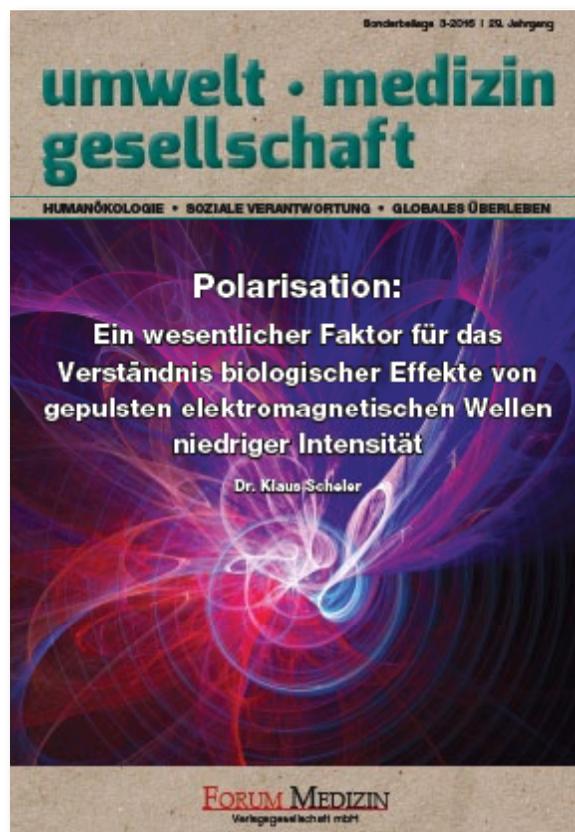
Tab. 5: Liste der Magnetsinn-Studien

Dr. Klaus Scheler

Polarisation: Ein wesentlicher Faktor für das Verständnis biologischer Effekte von gepulsten elektromagnetischen Wellen niedriger Intensität

In den Scientific Reports (Hrsg. Nature-Gruppe) wurde die Studie von Panagopoulos et al. (2015) „Polarisation: ein wesentlicher Unterschied zwischen künstlich erzeugten und natürlichen elektromagnetischen Feldern in Bezug auf biologische Aktivität“ veröffentlicht. Sie stellt die Hypothese auf, dass die Polarisation, also die feste Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors der Welle, ein entscheidender Faktor für das Verständnis von biologischen Effekten elektromagnetischer Strahlung niedriger Intensität ist. Der Physiker Dr. Klaus Scheler stellt in der 12-seitigen UMG-Beilage 3/2016 diese Studie und ihre Bedeutung allgemeinverständlich dar:

„Im Rahmen eines allgemein anerkannten elektrochemischen Modells der Zellmembran und ihrer Funktionen können sie beweisen, dass polarisierte (!) elektromagnetische Wellen – wie z. B. die Mobilfunkstrahlung – bereits aufgrund ihrer Polarisation und schon bei schwachen Intensitäten in der Lage sind, spezielle Ionenkanäle (Kanalproteine) in der Zellmembran ohne biologische Notwendigkeit irregulär zu aktivieren (...) Ionenkanäle fungieren als Schleusen und steuern in Abhängigkeit von der Membranspannung den Ionenfluss zwischen dem Inneren und Äußeren der Zelle. Ein irreguläres, von außen erzwungenes Öffnen bzw. Schließen dieser Kanäle bringt die elektrochemische Balance zwischen dem Inneren der Zelle und ihrer Umgebung aus dem Gleichgewicht und setzt damit eine Vielfalt von zellbelastenden und ggf. sogar schädigenden chemischen Reaktionen im Innern der Zelle in Gang.“



Bezug der Beilage:

Forum-Medizin-Verlag: www.forum-medizin.de | E-Mail: sekretariat@forum-medizin.de

diagnose:funk online-shop: <https://shop.diagnose-funk.org/> | oder E-Mail: versand@diagnose-funk.de

Isabel Wilke

Review: Studienergebnisse zur WLAN-Frequenz

umwelt · medizin · gesellschaft 1/2018 veröffentlichte den Studienüberblick (Review) „Biologische und pathologische Wirkungen der 2,45 GHz auf Zellen, Fruchtbarkeit, Gehirn und Verhalten“, verfasst von Dipl. Biol. Isabel Wilke, Redakteurin des ElektromogReports. Der Review dokumentiert mehr als 100 Studien, die Gesundheitsrisiken der Trägerfrequenz 2,45 GHz und der gepulsten Variante WLAN nachweisen.

Der Physiker Dr. Klaus Scheler schreibt zu diesem Review: „Der Review entstand nach einer intensiven weltweiten Recherche und Auswertung von über 100 Studien, die beeinträchtigende bis schädigende Wirkungen von 2,45 GHz und von WLAN für u.a. folgende Endpunkte dokumentieren: Fortpflanzung und Fruchtbarkeit (18 Studien und 8 Reviews), Gehirn und Gehirnentwicklung (12 Studien), Nervensystem und Verhalten (22 Studien), DNA-Schädigungen und Tumorrisiko (29 Studien), Zellmembran, oxidativer Zellstress (41 Studien und 1 Review), Organe (Herz, Leber, Schilddrüse, 7 Studien), Bakterien und Pflanzen (je 2 Studien). Äußerst brisant ist, dass die meisten der Studien Schädigungen auch bei Leistungsflussdichten bzw. SAR-Werten deutlich unterhalb der Grenzwerte dokumentieren, zum Teil sogar bei sehr kleinen Intensitäten.

Der Review beschränkt sich nicht nur auf eine Auflistung von Studien und ihren Ergebnissen. Der Leser erfährt außerdem, wie die beobachteten Wirkungen biologisch einzuordnen sind, wie Wissenschaftler, Ärzte und Organisationen bereits reagiert haben und welche Schlussfolgerungen gezogen werden müssen: „Angesichts der Ergebnisse und der immer stärker auftretenden WLAN-Netze sollte die Zeit, der man WLAN-Strahlung ausgesetzt ist, begrenzt werden,“ oder: „Die negativen Auswirkungen auf Lernen, Aufmerksamkeit und Verhalten begründen für Erziehungsinstitutionen aller Altersstufen einen Verzicht auf WLAN-Anwendungen.“



Bezug der Beilage:

Forum-Medizin-Verlag: www.forum-medizin.de | E-Mail: sekretariat@forum-medizin.de

diagnose:funk online-shop: <https://shop.diagnose-funk.org/> | oder E-Mail: versand@diagnose-funk.de

FORUM MEDIZIN
Verlagsgesellschaft mbH