

## 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.



<b>1.</b>	<b>Biologische Wirkung von elektromagnetischen Feldern (EMF)</b>	<b>3</b>
1.1	Magnetsinn	5
1.2	Cryptochrom	5
1.3	Magnetit	7
<b>2.</b>	<b>Übersicht der Forschungslage zum Thema.</b>	<b>7</b>
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
<b>3.</b>	<b>Kommentierte Auflistung einzelner Studien</b>	<b>10</b>
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
<b>4.</b>	<b>Bilanz der Forschungslage und des Wissensstandes Anfang 2020.</b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>Appendix</b>	<b>17</b>
5.1	Liste der Abkürzungen	17
5.2	Berechnungen	17
	<b>Literatur</b>	<b>18</b>
	<b>Tabellen</b>	<b>21</b>

## 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).

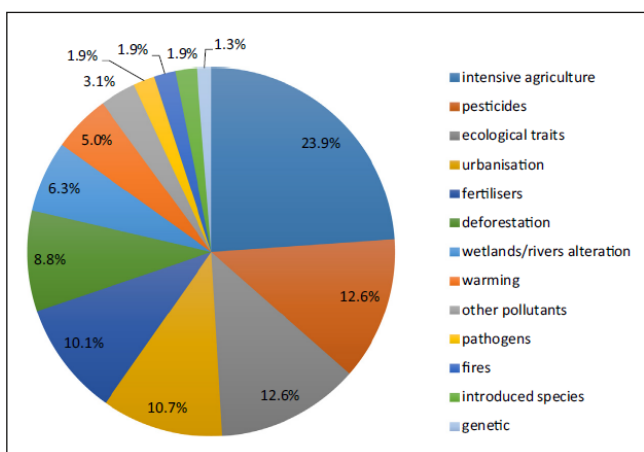


Abb. 1: Hauptursachen des rezenten Insektensterbens.  
Quelle: Sánchez-Bayo und Wyckhuys 2019

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 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) 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).

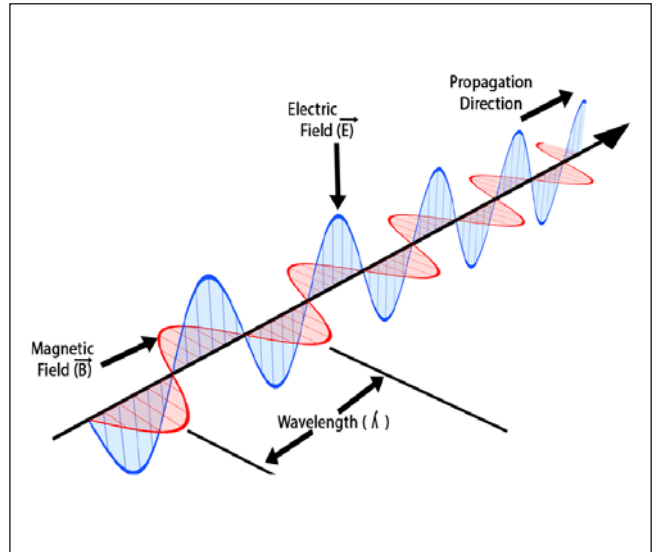


Abb. 3: Elektromagnetische Welle. Elektrische Feldstärke in blau, magnetische in rot. Aus beiden Feldstärken kann die Strahlungsintensität oder auch Leistungsdichte eines EMF abgeleitet werden (siehe Anhang). Quelle: <https://byjus.com/physics/characteristics-of-em-waves/>

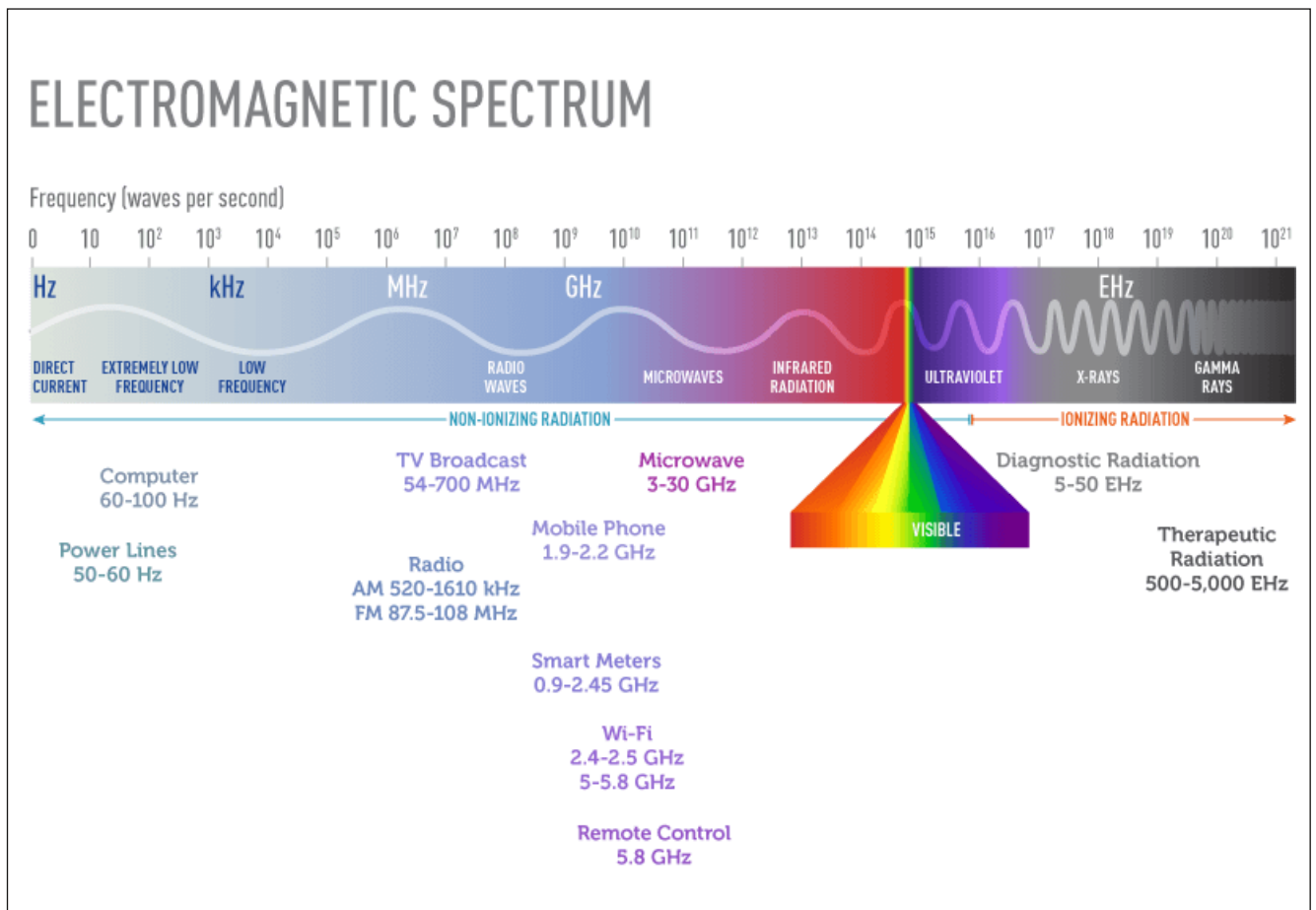


Abb. 2: Elektromagnetisches Spektrum. Quelle: <https://thinktankgreen.com/emf-testing/facts-education/electromagnetic-spectrum/>