

# Wirkungen anthropogener elektromagnetischer Felder auf die belebte Umwelt

## *Effects of anthropogenic electromagnetic fields on flora, fauna, and environment*

### ZUSAMMENFASSUNG

Im November 2019 organisierte das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) einen internationalen Workshop, um den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zu den Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf Tiere, Pflanzen und Ökosysteme zu erfassen. Solche Felder werden beispielweise von Stromleitungen, Erd- und Seekabeln, drahtlosen Ladestationen und Funkanlagen emittiert und können in Tieren und Pflanzen unterschiedliche Reaktionen hervorrufen. Mögliche Wirkmechanismen bei Frequenzen kleiner als 100 Megahertz sind körperinterne Ströme, der Radikalpaarmechanismus und die Kraftwirkung auf das Mineral Magnetit. Oberhalb von 100 Megahertz ist nur die Wärmewirkung wissenschaftlich belegt. Bei Tieren wurden Verhaltens-, bei Pflanzen Wachstumsänderungen als Reaktion auf statische und niederfrequente Felder beschrieben, wissenschaftliche Nachweise für daraus resultierende Beeinträchtigungen wurden bisher nicht erbracht. Ebenfalls wurden keine negativen Auswirkungen hochfrequenter Felder des Mobilfunks nachgewiesen. Verbleibende offene Fragen können nur durch weiterführende Forschung geklärt werden.

BLANKA POPHOF,  
JENS KUHNE

### ABSTRACT

*In November 2019, the Federal Office for Radiation Protection (BfS) organized an international workshop to sum up the current scientific knowledge on the effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on animals, plants and ecosystems. Such fields are emitted for example from power lines, underground and subsea cables, wireless charging systems and broadcast stations and can elicit various reactions in animals and plants. Possible action mechanisms at frequencies lower than 100 megahertz are excitation of nerves and muscles, radical pair mechanism and force acting on the mineral magnetite. Above 100 megahertz only the thermal effect has been scientifically proven. Behavioral reactions in animals and growth changes in plants have been described in response to static and low-frequency fields, but there is no scientific evidence for a resulting impairment. No negative effects of radiofrequency fields from mobile communication have been established. Remaining open questions can only be clarified by further research.*

### EINLEITUNG

Der Klimawandel und der Ausstieg aus der Kernenergie haben eine zunehmende Nutzung von erneuerbaren Energien zur Folge. Hierfür werden Stromnetze ertüchtigt und

neue Stromtrassen gebaut. Dies wird zu Veränderungen im Auftreten von niederfrequenten und statischen elektrischen und magnetischen Feldern führen. Im Zusammenhang mit der Energiewende und der verstärkten Nutzung der Elektromobilität



Quelle: focusfinder/  
stock.adobe.com.

wird ein Ausbau drahtloser Ladestationen, von denen zwischenfrequente Felder ausgehen, erwartet. Der ständige Ausbau mobiler Kommunikationssysteme, wie zum Beispiel die Einführung des Mobilfunkstandards 5G, ist mit Veränderungen von Immissionsmustern hochfrequenter elektromagnetischer Felder verbunden. All diese Felder wirken nicht nur auf den Menschen, sondern auch auf Tiere, Pflanzen und Ökosysteme ein. Die Wirkungen auf den Menschen sind gut untersucht und grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass die zum Schutz des Menschen empfohlenen Begrenzungen der Exposition auch zum Schutz der belebten Umwelt geeignet sind (ICNIRP 2000). Jedoch gelten von diesen Empfehlungen abgeleitete nationale

Grenzwerte typischerweise nur dort, wo sich Menschen aufhalten. Flugfähige Tiere können in die Nähe der Leiterseile oder Sendeanlagen gelangen und Feldern ausgesetzt sein, die deutlich höhere Expositionen zur Folge haben (ABBILDUNG 1).

Weiterhin besitzen bestimmte Organismen teilweise andere Rezeptoren und Signalwege als der Mensch, sodass diese empfindlich auf elektromagnetische Felder reagieren könnten. Um den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zu den Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder aller Frequenzbereiche auf Tiere, Pflanzen und Ökosysteme zu erfassen, hat das BfS im November 2019 einen mehrtägigen internationalen Workshop



durchgeführt. Beteiligt waren Forschende aus den Bereichen Strahlenschutz, Physik, Biologie und Ökologie (BfS 2020; Pophof et al. 2022a, b). Im Folgenden werden die Beiträge zusammengefasst und um aktuelle Publikationen (nach 2019) ergänzt. Die Abstracts können unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2020050821802> eingesehen werden.

## ELEKTROMAGNETISCHE FELDER IN DER UMWELT

Elektromagnetische Felder werden von vielfältigen Quellen in verschiedenen Frequenzbereichen emittiert (siehe auch <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/einfuehrung/einfuehrung.html>). Von den in Deutschland geplanten Gleichstromleitungen werden zukünftig statische elektrische und magnetische Felder ausgehen. In der Umgebung von Wechselstromleitungen treten niederfrequente elektrische und magnetische Felder mit einer Frequenz von 50 Hertz (Haushaltsstrom) und 16,7 Hertz (Bahnstrom) auf. Erdkabel sind nur von statischen oder niederfrequenten magnetischen Feldern umgeben, das

elektrische Feld wird durch Kabelisolation und Erdreich abgeschirmt. Von Seekabeln gehen statische und niederfrequente magnetische Felder aus, die im leitfähigen Meerwasser elektrische Wirbelströme induzieren. Drahtlose Ladestationen für Elektrofahrzeuge emittieren zwischenfrequente Felder im Kilohertzbereich und Radio-, Fernseh- und Mobilfunksendeanlagen senden hochfrequente elektromagnetische Felder vorwiegend im Megahertz- und Gigahertz-Bereich aus.

Die physikalischen Eigenschaften solcher Felder (u. a. Frequenz, Modulation, Polarisation, räumliche Verteilung und Höhe der Feldstärken/Flussdichten) hängen von den Eigenschaften der Quelle und von Topologie und Objekten in der Umgebung der Quelle ab. Deshalb ist der Abstand von der Quelle typischerweise kein guter Schätzer für die Exposition. Für eine verlässliche Expositionsbestimmung sind Messungen und/oder Berechnungen notwendig.

Durch elektromagnetische Induktion oder Influenz werden von Feldern, die sich außerhalb des Körpers eines Lebewesens befinden, Felder und Ströme innerhalb des Körpers verursacht. Die Stärke der entstehenden

**ABBILDUNG 1**  
Tauben, die nahe an Mobilfunksendeanlagen vorbeifliegen, sind hochfrequenten elektromagnetischen Feldern oberhalb der für Menschen gültigen Grenzwerte ausgesetzt.  
Quelle: Anucha/stock.adobe.com.



körperinternen Felder hängt von den physikalischen Eigenschaften der externen Felder, der Anatomie (u. a. Größe) und Ausrichtung des Lebewesens und den dielektrischen Gewebeeigenschaften ab.

## WIRKMECHANISMEN

Körperinterne elektrische Felder und Ströme können biologische Wirkungen wie Nerven- und Muskelreizung hervorrufen, zusätzlich kann durch Energieabsorption Wärme entstehen. Diese Wirkungen sind gut bekannt und der Mensch ist vor diesen Wirkungen geschützt, wenn die internationalen Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition eingehalten werden (ICNIRP 2009; 2010; 2020)

Demgegenüber besitzen viele Tiere einen Magnetsinn oder spezialisierte Elektrorezeptoren, die weitere, beim Menschen nicht vorhandene Wirkungen ermöglichen. Beim Magnetsinn werden zwei mögliche Mechanismen diskutiert.

### RADIKALPAARMECHANISMUS

Der Radikalpaarmechanismus beruht auf einem quantenmechanischen Prozess. Radikale sind Atome, Moleküle oder Ionen, die ein ungepaartes Außenelektron aufweisen. Ein Radikalpaar besteht aus zwei solchen Radikalen, die einem gemeinsamen, durch eine (photo-)chemische Reaktion gespaltenen, Ursprungsmolekül entstammen. Die Spins der beiden Radikale können sich entweder verstärken oder aufheben, sodass der Gesamtelektronenspin des Radikalpaars 1 oder 0 beträgt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand mit Gesamtelektronenspin 1 oder 0 vorliegt, kann durch Richtung und Stärke eines Magnetfeldes, insbesondere des Erdmagnetfeldes, verändert werden. Da abhängig vom Gesamtelektronenspin unterschiedliche biochemische Reaktionen möglich sind, übt das Erdmagnetfeld zugleich einen Einfluss auf den biochemischen Reaktionsverlauf aus. Am besten untersucht ist dieser Mechanismus bei Zugvögeln (Hore, Mouritsen 2022).

Diese haben in der Netzhaut Blaulichtrezeptoren (Cryptochrome), in denen ein Farbstoff (Flavin) gebunden ist. Durch Magnetfelder verursachte Veränderungen in diesem System ermöglichen Zugvögeln die Wahrnehmung des Erdmagnetfeldes. Diese kann durch hochfrequente anthropogene elektromagnetische Felder im Bereich bis 100 Megahertz gestört werden. Bei Pflanzen gibt es ebenfalls deutliche Hinweise auf veränderte biochemische Prozesse durch Magnetfelder aufgrund des Radikalpaarmechanismus, bei Insekten und Säugetieren wird es vermutet.

### MAGNETIT

Das eisenhaltige Mineral Magnetit wurde in vielen Lebewesen nachgewiesen. Wenn ein Magnetfeld eine Kraftwirkung auf Magnetitpartikel ausübt, können sich diese im Magnetfeld bewegen und mittels Mechanorezeptoren eine Signalwirkung in Nervenzellen zur Folge haben, die dann zur Wahrnehmung des Magnetfeldes führt (Winklhofer, Kirschvink 2010). Bei magnetotaktischen Bakterien aus der Tiefsee ist dieser Mechanismus wissenschaftlich belegt. Vermutet wird er auch bei Insekten, Vögeln und Säugetieren, ein entsprechender Rezeptor und ein neuronaler Signalweg wurden bisher jedoch nicht entdeckt.

### ELEKTROREZEPTION

Viele Fische haben Elektrorezeptoren, mit denen sie die im Meereswasser induzierten elektrischen Felder wahrnehmen können. Vor allem Haie und Rochen haben hierfür besonders empfindliche Organe, die Lorenzini-Ampullen. Sie können damit die durch das Erdmagnetfeld induzierten Felder wahrnehmen und sich danach orientieren, oder die biogenen elektrischen Felder von Beutetieren wahrnehmen (Kalmijn et al. 2002).

Insekten nehmen elektrische Felder als Vibration wahr – entweder durch das Johnston Organ (ein Mechanorezeptor in der Antenne), oder über die Körperbehaarung, wie zum Beispiel Bienen und Hummeln (Clarke et al. 2019).

## MEERESTIERE

Im Zusammenhang mit der Energiewende werden vermehrt Offshore-Windenergieanlagen gebaut. Dies hat einen verstärkten Ausbau von Seekabeln zur Folge, von denen statische oder niederfrequente magnetische Felder ausgehen. Viele Fischarten, wie Lachse oder Aale, wandern regelmäßig über große Strecken und nutzen dabei das Erdmagnetfeld zur Orientierung. Daher können sie die von Seekabeln ausgehenden Felder wahrnehmen. Wenn sie über ein Kabel schwimmen, stocken sie kurz oder verändern ihre Route geringfügig. Eine Barrierefunktion haben Seekabel für diese Arten nicht.

Haie und Rochen können sehr schwache elektrische Felder ab etwa 5 Nanovolt pro Zentimeter wahrnehmen, sich danach orientieren oder nach Beute suchen. Es kommt vor, dass sie Seekabel mit Beute verwechseln und sogar in Kabel beißen. Sie sind aber lernfähig und lernen unter experimentellen Bedingungen schnell zwischen Feldern mit und ohne Belohnung zu unterscheiden.

Insgesamt haben Felder von Seekabeln keine direkten negativen physiologischen Wirkungen auf Wirbeltiere oder Wirbellose. Bisher sind nur Verhaltensreaktionen bekannt. Solange Begegnungen mit Kabeln selten sind, hat das auf der Populationsebene keine Folgen. Sollte mit zunehmender Anzahl der Kabel das Verhalten zu häufig gestört werden, kann es den Energieaufwand der Tiere erhöhen und möglicherweise Folgen für die Verteilung und Zusammensetzung von Arten haben. Deswegen muss die Situation weiter durch Forschung begleitet werden (Gill, Desender 2020).

## INSEKTEN

Bienen können elektrische Felder wahrnehmen und nutzen sie unter anderem zur sozialen Kommunikation während des Bientanzes (Greggers et al. 2013). Bienen und Hummeln nehmen auch die elektrische Aufladung von Blumen wahr und können

diese Information nutzen, um den Nektargehalt von Blumen abzuschätzen (Clarke et al. 2019).

Starke elektrische Felder unterhalb von Stromleitungen können in Bienenstöcken elektrische Felder verursachen, die bei Bienen Kontaktströme und Elektroschocks hervorrufen können. Dies kann das Verhalten der Bienen so weit stören, dass die Vermehrungsrate und die Menge des gesammelten Honigs sinkt und die Überlebensrate der Bienenstöcke beeinträchtigt wird (Bindokas et al. 1988). Solche Untersuchungen wurden oberhalb der derzeit gültigen Grenzwerte durchgeführt und die Ströme und Felder gezielt in die Bienenstöcke eingebracht, beziehungsweise maximiert. Ob derartige Effekte unter heutigen realistischen Bedingungen auftreten können, ist nicht untersucht.

Bienen können das Erdmagnetfeld wahrnehmen und sich danach orientieren (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink 1991). Niederfrequente Magnetfelder nehmen sie ebenfalls wahr, aber mit einer geringeren Empfindlichkeit.

Unterhalb von Stromleitungen können Bienen magnetischen Flussdichten von bis zu 100 Mikrottesla ausgesetzt sein, in unmittelbarer Nähe der Leiterseile auch einigen Millitesla. Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass Felder dieser Größenordnung die Lernfähigkeit, das Flugverhalten und die Nahrungsaufnahme von Bienen stören können (Shepherd et al. 2018). Im Freiland wurden in der Nähe von Stromleitungen die Auswirkungen von Pestiziden und Magnetfeldern und deren Kombination auf Bienen untersucht (Lupi et al. 2021). Am Standort mit Magnetfeldern zeigten Bienen eine erhöhte Aktivität. Die Vitalparameter der Bienenstöcke und die Überlebensrate waren an dem Standort mit kombinierter Belastung am schlechtesten.

In unmittelbarer Nähe von Mobilfunkanlagen können Insekten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern oberhalb der für Menschen geltenden Grenzwerte ausgesetzt sein. Die damit verbundene höhere Energieaufnahme kann zur

Gewebeerwärmung führen. Zusätzlich wird Energie am effizientesten aufgenommen, wenn die halbe Wellenlänge in etwa der Körperlänge des Tieres entspricht. Für Insekten wird dies vor allem nach der Einführung von höheren Mobilfunkfrequenzen für den Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) zutreffen. Berechnungen haben für verschiedene Insektenarten, unter anderem Bienen, gezeigt, dass die Energieaufnahme bei Frequenzen oberhalb von 3 Gigahertz deutlich ansteigt (Thielens et al. 2020).

In bisherigen Freilandstudien zum Einfluss hochfrequenter Felder auf Bienen wurden vereinzelt negative Auswirkungen beobachtet, überwiegend waren diese Studien aber von mangelhafter Qualität: Es wurden beispielsweise Endgeräte wie Schnurlostelefone oder Handys genutzt, um Aussagen über Wirkungen von durch Mobilfunksendeanlagen verursachten Immissionen zu treffen, die Expositionsbestimmung war somit mangelhaft. Zusätzlich waren die Studien nicht verblindet, die Forschenden wussten also, welche Bienenstöcke exponiert sind und welche nicht. Das kann auch unbewusst zu Fehlern bei der Auswertung führen. Aus diesen Studien lassen sich daher keine belastbaren Aussagen ableiten.

Hochfrequente Felder von Basisstationen hatten unter realistischen Bedingungen im Freiland keinen Einfluss auf die Reproduktion von mehreren Insektenarten. Untersucht wurden Springschwänze, Wanzen, Wespen und Fruchtfliegen (Vijver et al. 2014). Eine Freilandstudie zum Vorkommen von Bienen und anderen Bestäubern (Wespen, Fliegen) wurde in der Umgebung von mehreren Basisstationen durchgeführt. Der Zusammenhang zwischen hochfrequenten Feldern und dem Vorkommen bestimmter Arten war komplex, einige nahmen mit steigender Feldstärke zu, andere ab. Die Artenvielfalt änderte sich insgesamt nicht (Lázaro et al. 2016).

In einer Übersichtarbeit haben Vanbergen et al. (2019) die Wirkungen elektromagnetischer Felder unterschiedlicher Frequenzen (inklusive sichtbares Licht) auf Bestäuber zusammengefasst: Die stärksten negativen

Auswirkungen gehen von sichtbarem Licht in der Nacht aus, beispielsweise von Straßen- und Gebäudebeleuchtung. Das statische Erdmagnetfeld dient vor allem der Orientierung. Niederfrequente Felder von Stromleitungen können das Verhalten und die Orientierung beeinträchtigen. Ergebnisse zu hochfrequenten Feldern sind widersprüchlich und zeigen keine eindeutige Tendenz.

Insgesamt ist der Wissensstand unzureichend und vor allem qualitativ hochwertige Freilandstudien an Stromleitungen und Sendeanlagen sind nötig, um die ökologischen Folgen der zunehmenden anthropogenen Felder in der freien Natur beurteilen zu können.

## VÖGEL

Zugvögel können das Erdmagnetfeld wahrnehmen und sich danach orientieren (Hore, Mouritsen 2022). Die Wahrnehmung erfolgt über den Blaulichtrezeptor Cryptochrom in der Netzhaut und basiert wahrscheinlich auf dem Radikalpaarmechanismus. Diese Reaktion kann durch schwache Wechselfelder im Frequenzbereich von 0,1 bis 100 Megahertz gestört werden, was unter Laborbedingungen zu einer Desorientierung der Vögel führt (Engels et al. 2014). Dieser Frequenzbereich betrifft weder Stromleitungen noch Mobilfunk, sondern ausschließlich Felder starker Radiosender und Hintergrundfelder von elektrischen und elektronischen Geräten. Störungen des Vogelzugs sind aufgrund dieser Ergebnisse nicht zu erwarten, da sich Vögel auch nach Sonne, Sternen oder Landmarken orientieren können. Freilanduntersuchungen zu diesem Thema liegen nicht vor.

## SÄUGETIERE

Der Magnetsinn bei Säugetieren ist bei weitem nicht so gut untersucht wie bei Vögeln (Burda et al. 2020). Fledermäuse nutzen nachweislich das Erdmagnetfeld zur Orientierung, der Wirkmechanismus basiert



vermutlich auf Magnetit (Holland et al. 2008). Bei vielen Nagetieren ist ebenfalls ein Magnetsinn nachgewiesen (Burda et al 2020). Bei unterirdisch in Dunkelheit lebenden Nagern wie Blindmullen beruht der Wirkmechanismus vermutlich auf Magnetit. Oberirdisch lebende Nager mit gut entwickelten Augen, wie Hausmäuse, Waldmäuse und Rötelmäuse nutzen vermutlich ähnlich wie Vögel den Blaulichtrezeptor Cryptochrom in der Netzhaut, sodass der Magnetsinn durch hochfrequente Felder im Megahertzbereich gestört werden kann. Dies erschwert die Erforschung der Wirkmechanismen im Labor, da solche Felder von elektrischen und elektronischen Geräten, die in Laboren genutzt werden, ausgehen (Phillips et al 2022).

Bei weiteren Säugetierarten, wie Rindern, Rehen, Wildschweinen, aber auch Hunden und Füchsen wurde beobachtet, dass sie sich bei bestimmten Aktivitäten bevorzugt in der Nord-Süd Richtung ausrichten. Bei Rindern und Rehen fiel dabei auf, dass dieses Verhalten möglicherweise durch Stromleitungen gestört wird (Burda et al. 2020) (ABBILDUNG 2). Ein zugrundeliegender Wirkmechanismus oder ein entsprechendes Sinnesorgan sind bei diesen Arten nicht bekannt. Da es sich ausschließlich um Beobachtungsstudien

handelt, sind diese Ergebnisse bisher nicht experimentell verifiziert.

Durch den Ausbau der Elektromobilität gibt es vermehrt drahtlose Ladestationen für Fahrzeuge. Diese emittieren Magnetfelder im Kilohertz-Bereich. Kleine Säugetiere, wie Mäuse, Ratten und Marder, aber auch Haustiere wie Katzen oder kleine Hunde, können unter die Autos geraten und in unmittelbarer Nähe der Spulen vergleichsweise starken Feldern ausgesetzt sein. Berechnungen haben gezeigt, dass der Schwellenwert für eine mögliche Nervenreizung nicht erreicht wird (Wang et al. 2019). Nur wenn Haustiere metallische Implantate im Körper tragen, besteht die Gefahr einer Erhitzung, die zu Gewebeschäden führen kann.

Aufgrund einzelner Berichte wurde postuliert, dass hochfrequente Felder von Basisstationen landwirtschaftlichen Nutztieren schaden. Ein ursächlicher Zusammenhang konnte jedoch nicht nachgewiesen werden und wird auch mechanistisch nicht gestützt. Der einzige wissenschaftlich nachgewiesene Wirkmechanismus hochfrequenter Felder ist Erwärmung infolge von Energieaufnahme, jedoch sind die Felder von Mobilfunkbasisstationen in Bodennähe zu schwach, um eine nennenswerte Körpererwärmung zu

ABBILDUNG 2  
Rehe unter Stromleitungen sind niederfrequenten Magnetfeldern ausgesetzt, die möglicherweise ihren Magnetsinn stören.  
Quelle: [jojoo64/stock.adobe.com](#).



verursachen. Lediglich Fledermäuse können sich Sendeanlagen annähern und oberhalb der Grenzwerte exponiert werden. Bei Fledermäusen wurde beobachtet, dass sie leistungsstarke Radaranlagen meiden (Nicholls, Racey 2009), aber nicht Basisstationen.

## PFLANZEN

Von Pflanzen ist bekannt, dass sie unter Laborbedingungen auf das Erdmagnetfeld und vor allem auf dessen Fehlen mit Veränderungen im Wachstum reagieren (Maffei 2014). Die Wirkung wird vermutlich über den Radikalpaarmechanismus in verschiedenen pflanzlichen Lichtrezeptoren – Phytochromen und Cryptochromen – vermittelt. Das Erdmagnetfeld und dessen Umpolarisation in der geologischen Vergangenheit hat möglicherweise auch zur Evolution von Pflanzen beigetragen.

Eine ältere Studie (Soja et al. 2003) zeigt, dass das Wachstum von Getreide unter Stromleitungen nicht beeinträchtigt ist und es auch sonst keine belastbaren Hinweise auf negative Auswirkungen von Stromleitungen auf Pflanzen gibt.

In Frankreich werden seit über 15 Jahren kurzfristige Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder unterhalb der Grenzwerte an Tomaten und Rosen untersucht (Vian et al. 2006). Es zeigten sich geringfügige Effekte, die als Stressreaktion interpretiert werden können. Die Expression einiger Gene und Proteine unterschied sich zwischen exponierter und nicht exponierter Gruppe. Die Antwort ist systemisch, das bedeutet, die gesamte Pflanze reagiert, auch wenn nur einige Blätter den Feldern ausgesetzt waren. Das erinnert an Reaktionen auf Verletzungen oder Fraß durch Schädlinge. Die Reaktion der Pflanzen klingt innerhalb weniger Stunden ab, eine Beeinträchtigung der Pflanze bedeutet sie nicht. Welche Wirkmechanismen beteiligt sind, bleibt unklar, es scheint der Kalziumhaushalt beeinflusst und reaktive Sauerstoffspezies beteiligt zu sein, epigenetische Mechanismen werden ebenfalls diskutiert (Kaur et al. 2021). Sollten diese

Ergebnisse reproduziert werden können, wäre dies ein Hinweis auf einen nicht-thermischen Effekt bei Frequenzen oberhalb von 100 Megahertz. Nicht-thermische Effekte bei diesen Frequenzen sind auch für Pflanzen bisher wissenschaftlich nicht nachgewiesen.

Baumschäden in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen wurden vereinzelt berichtet und überwiegend durch Fotodokumentationen belegt. Wegen fehlender Zufallsauswahl und Berücksichtigung von bekannten anderen Einflussfaktoren sind solche Studien jedoch ungeeignet, um einen ursächlichen Zusammenhang zu untersuchen. Die bereits beschriebenen, unter kontrollierten Laborbedingungen beobachteten Effekte (Vian et al. 2006, Kaur et al. 2021) sind deutlich kleiner und es ist unklar, ob sie unter natürlichen Bedingungen mit vielen weiteren Einflüssen wie Hitze und Wassermangel infolge des Klimawandels überhaupt bemerkbar wären.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Tiere, Pflanzen und Ökosysteme werden zunehmend anthropogenen elektromagnetischen Feldern aller Frequenzbereiche ausgesetzt. In einigen Bereichen sind die Wirkungen gut untersucht, in anderen gibt es Wissenslücken, vor allem durch einzelne, bisher nicht reproduzierte Studien und durch Ergebnisse im Labor, deren Bedeutung im Freiland unter vielfältigen Einflüssen nicht bekannt ist. Aus Sicht des Strahlenschutzes werden Freilandstudien an Insekten, insbesondere Bestäubern/Bienen empfohlen. Weiterhin sind Labor- und Freilandstudien an Pflanzen notwendig, um bisher nicht reproduzierte Effekte zu bestätigen oder zu widerlegen. Zu möglichen Wirkmechanismen stehen insbesondere der Radikalpaarmechanismus und die etwaige Beteiligung reaktiver Sauerstoffspezies im Fokus. Das BfS plant in diesen Bereichen weitere Forschung. ●



## LITERTURVERZEICHNIS

- Bindokas VP, Gauger JR, 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. *Bioelectromagnetics* 9 (3): 285–301. DOI: 10.1002/bem.2250090310.
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.) (2020): Internationaler Workshop zum Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf die belebte Umwelt – Vorhaben 3619102420. urn:nbn:de:0221-2020050821802.
- Burda H, Begall S, Hart V (2020): Magnetoreception in Mammals. In: Fritzsche B (Hrsg.): *The Senses: A Comprehensive Reference* (Second Edition). Amsterdam: Elsevier: 421–444. DOI: 10.1016/B978-0-12-809324-5.24131-X.
- Clarke D, Morley E, Robert D (2019): The bee, the flower, and the electric field: Electric ecology and aerial electroreception. *J Comp Physiol A* 203: 737–748. DOI: 10.1007/s00359-017-1176-6.
- Engels S, Schneider NL, Lefeldt N et al. (2014): Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature* 509 (7500): 353–356. DOI: 10.1038/nature13290.
- Gill A, Desender M (2020): Risk to animals from electromagnetic fields emitted by electric cables and marine renewable energy devices. In: OES-Environmental (Hrsg.): *State of the science report*, Chapter 5. United States: Pacific Northwest National Lab: 87–103. DOI: 10.2172/1633088.
- Greggers U, Koch G, Schmidt V et al. (2013): Reception and learning of electric fields in bees. *Proc Biol Sci* 280: 20130528. DOI: 10.1098/rspb.2013.0528.
- Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG et al. (2008): Bats use magnetite to detect the earth's magnetic field. *PLoS One* 3 (2): e1676. DOI: 10.1371/journal.pone.0001676.
- Hore PJ, Mouritsen H (2022): How Migrating Birds Use Quantum Effects to Navigate. *Sci Am* 326 (4): 26–31. DOI: 10.1038/scientificamerican0422-26.
- ICNIRP – International Commission on Non-ionizing radiation protection (2020): Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 KHz to 300 GHz). *Health Phys* 118: 483–524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- ICNIRP – International Commission on Non-ionizing radiation protection (2010): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 KHz). *Health Phys* 99: 818–836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86
- ICNIRP – International Commission on Non-ionizing radiation protection (2009): Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96: 504–514. DOI: 10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a.
- ICNIRP – International Commission on Non-ionizing radiation protection (2000): Effects of electromagnetic fields on the living environment. In: Matthes R, Bernhardt JH, Repacholi MH (Hrsg.): *Proceedings of the International Seminar on Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment*. Ismaning, Germany, October 4 and 5 1999.
- Kalmijn AJ, Gonzalez IF, McClune MC (2002): The physical nature of life. *J Physiol Paris* 96 (5–6): 355–362. DOI: 10.1016/S0928-4257(03)00014-7.
- Kaur S, Vian A, Chandel S et al. (2021): Sensitivity of plants to high frequency electromagnetic radiation: Cellular mechanisms and morphological changes. *Rev Environ Sci Biotechnol* 20: 55–74. DOI: 10.1007/s1157-020-09563-9.
- Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A (1991): Is geomagnetic sensitivity real? Replication of the Walker-Bitterman conditioning experiment in honey bees. *Am Zool* 31 (1): 169–185.
- Lázaro A, Chroni A, Tscheulin T et al. (2016): Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators. *J Insect Conserv* 20: 315–324. DOI: 10.1007/s10841-016-9868-8.
- Lupi D, Mesiano MP, Adani A et al. (2021): Combined effects of pesticides and electromagnetic-fields on honeybees: Multi-stress exposure. *Insects* 12 (8): 716. DOI: 10.3390/insects12080716.
- Maffei ME (2014): Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front Plant Sci* 5: 445. DOI: 10.3389/fpls.2014.00445.
- Nicholls B, Racey PA (2009): The aversive effect of electromagnetic radiation on foraging bats: A possible means of discouraging bats from approaching wind turbines. *PLoS One* 4 (7): e6246. DOI: 10.1371/journal.pone.0006246.
- Phillips J, Muheim R, Painter M et al. (2022): Why is it so difficult to study magnetic compass orientation in murine rodents? *J Comp Physiol* 208 (1): 197–212 A. DOI: 10.1007/s00359-021-01532-z.
- Pophof B, Henschenmacher B, Kattnig DR et al. (2022a): Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora. Workshop Report. *Health Phys* (in press).
- Pophof B, Henschenmacher B, Kattnig DR et al. (2022b): Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields above 100 MHz on fauna and flora. Workshop report. *Health Phys* (in press).

Shepherd S, Lima MAP, Oliveira EE et al. (2018): Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees. *Sci Rep* 8 (1): 7932. DOI: 10.1038/s41598-018-26185-y.

Soja G, Kunsch B, Gerzabek M et al. (2003): Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mays* L.) near a high voltage transmission line. *Bioelectromagnetics* 24 (2): 91–102. DOI: 10.1002/bem.10069.

Thielens A, Greco MK, Verloock L et al. (2020): Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Sci Rep* 10: (1): 461. DOI: 10.1038/s41598-019-56948-0.

Vanbergen AJ, Potts SG, Vian A (2019): Risk to pollinators from anthropogenic electro-magnetic radiation (EMR): Evidence and knowledge gaps. *Sci Total Environ* 695: 133833. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133833.

Vian A, Roux D, Girard S, Bonne P et al. (2006): Microwave irradiation affects gene expression in plants. *Plant Signal Behav* 1 (2): 67–70. DOI: 10.4161/psb.1.2.2434.

Vijver M, Bolte J, Evans T et al. (2014): Investigating short-term exposure to electromagnetic fields on reproductive capacity of invertebrates in the field situation. *Electromagn Biol Med* 33 (1): 21–28. DOI: 10.3109/15368378.2013.783846.

Wang Q, Li W, Kang J et al. (2019): Electromagnetic safety evaluation and protection methods for a wireless charging system in an electric vehicle. *IEEE Trans Electromagn Compat* 61 (6): 1913–1925. DOI: 10.1109/TEMC.2018.2875903.

Winklhofer M, Kirschvink JL (2010): A quantitative assessment of torque-transducer models for magneto-reception. *J Roy Soc Interface* 7 (Suppl 2): S273–S289. DOI: 10.1098/rsif.2009.0435.focus.

## KONTAKT

Dr. habil. Blanka Pophof  
Bundesamt für Strahlenschutz  
Kompetenzzentrum elektromagnetische Felder  
Ingolstädter Landstraße 1  
85764 Oberschleißheim  
E-Mail: bpophof@bfs.de

[BfS]