

Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

18.08.2022

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Universität Neuenburg

Verfasser und Redaktion: Matthieu Mulot, Thomas Kroeber, Martin Gossner, Jürg Fröhlich

Betreuung durch das BAFU: Maurane Riesen, Christopher Gerpe

Unterstützung/Finanzierung: Dieser Bericht wurde vom Bundesamt für Umwelt (Abteilung Lärm und NIS) in Auftrag gegeben und finanziert.

Anmerkung: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) erstellt. Der Auftragnehmer haftet allein für den Inhalt.

Empfohlene Zitierweise:

Mulot M., Kroeber T., Gossner M., Fröhlich J. (2022) Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden, Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Neuenburg, Juli 2022.

Vervielfältigungsrecht:

CC-BY-NC-ND

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abkürzungen.....	4
Einführung	5
Methoden.....	9
PECO-Formel (Schritt 1).....	11
Festlegung der Schlüsselwörter und Suchkriterien	12
Ein- und Ausschlusskriterien (Schritt 2)	13
Datenerhebung (Schritt 3)	13
Qualitative Bewertung der ausgewählten Studien (Schritt 4)	14
Abschätzung der Verlässlichkeit der Gesamtheit der Nachweise (Schritt 5)	15
Ergebnisse	16
Auswahl der Studien, Datenerhebung und qualitative Bewertung.....	16
Wirkung auf Arthropoden.....	19
Überlebens- und Sterblichkeitsrate	22
Fortpflanzung	23
Schädigung der DNA	25
Verhalten	26
Zirkadianer Rhythmus	27
Flugverhalten	27
Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten.....	28
Orientierung	29
Wirkung auf die Körperfunktionen und Stoffwechsel im Allgemeinen	30
Thermische Wirkung	31
Fortbewegungsgeschwindigkeit	32
Zellstress	33
Population.....	34
Ökosystemebene	34

Zusammenfassung der Ergebnisse.....	35
Diskussion	37
Vergleich mit bestehenden Schriften	37
Welches sind die Wirkmechanismen von NIS bei Auswirkungen auf das Verhaltens ?....	38
Schwierigkeit, ein solides experimentelles Design zu schaffen, das eine reale Umweltexposition simuliert	39
Zuverlässigkeit der Bewertung der Wirkung von NIS und der damit verbundenen Gefahren	
40	
Risiko für die Arthropoden-Populationen.....	41
Risiko für die Ökosysteme	42
Schlüsselemente	42
Danksagung.....	43
Finanzierung	44
Literaturangaben.....	44
Anhänge	56
1) Detaillierte Tabellen über die Wirkung von NIS.....	56
2) Raster zur Bewertung der Studienqualität	83
3) Gesetzliche Immissionsgrenzwerte für NIS, festgelegt durch die NISV und die ICNIRP	
84	
4) Bewertung der Qualität der ausgewählten Studien	85

Zusammenfassung

Nichtionisierende Strahlung (NIS) wird als eine Reihe von Wellen beschrieben, die aus oszillierenden elektrischen und magnetischen Feldern bestehen, sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und den Atomen und Molekülen des Materials, das sie durchdringen, keine Elektronen entziehen. Anthropogene NIS kommt unter einer Vielzahl von Bedingungen vor und wird z. B. durch Hochspannungsleitungen, Mobiltelefone, Rundfunk und WLAN erzeugt. Der Emissionsgrad von NIS ist reguliert, um die Menschen vor negativen Auswirkungen auf ihre Gesundheit zu schützen. Ihre potenziellen direkten und indirekten Auswirkungen auf Arthropoden sind jedoch nur unzureichend erforscht. Dies betrifft auch die aufgrund der Regulierung erlaubten Expositionen. In dieser Literaturübersicht haben wir den Wissensstand über die letalen und subletalen Effekte von NIS auf Arthropoden zusammengefasst und bewertet. Wir haben dabei 127 Studien gefunden, in denen die Wirkung von NIS auf Arthropoden untersucht wurde. Wir haben die Qualität der Studien bewertet, um ihren Evidenzgrad zu ermitteln, und die Ergebnisse bzgl. der biologischen Wirkungen in verschiedenen Frequenzbereichen (0 - 100 kHz, 100 kHz - 6 GHz, 6 GHz - 300 GHz) kategorisch zusammengefasst. Dabei konnten wir potenzielle Wirkungen auf Verhalten, Stoffwechsel, Zellstress, Fortpflanzung und DNA-Schädigung für Frequenzen bis 6 GHz feststellen. Für Frequenzen über 6 GHz ist der Evidenzgrad schwach oder unzureichend, was vor allem der geringen Anzahl von Studien geschuldet ist. Diese Wirkungen wurden vor allem bei experimentellen Expositionintensitäten unterhalb der Immissionsgrenzwerte (IGW) festgestellt, die von der Internationalen Kommission zum Schutz vor NIS (ICNIRP) zum Schutz des Menschen vor negativen gesundheitlichen Auswirkungen von NIS empfohlen wurden. Die allgemeine Qualität der Studien reicht jedoch häufig nicht aus, um solide Dosis-Wirkungs-Beziehungen herzustellen, was insbesondere auf technisch unzureichende oder die Statistik verzerrende Versuchsanordnungen, respektive -protokolle zurückzuführen ist. Zudem werden die Studien in der überwiegenden Mehrheit der Fälle in einem Käfig durchgeführt, aus dem die Arthropoden nicht entkommen können, sodass die experimentellen Expositionen nicht zwangsläufig die realen Umweltbedingungen widerspiegeln.

Auch wenn die Wirkung von NIS auf Arthropoden zumindest teilweise nachgewiesen wurde, so bleibt es schwierig, das Ausmass dieser Wirkung auf grösserer Skala (Population, Ökosysteme usw.) abzuschätzen. Es bedarf daher der Durchführung solider, reproduzierbarer und grossangelegter weiterer Studien.

Abkürzungen

Für diesen Bericht haben wir uns entschieden, die englischen Abkürzungen beizubehalten, um einerseits Einheitlichkeit zwischen der deutschen und der französischen Version und andererseits Konsistenz zu der in englischer Sprache verfassten Literatur herzustellen.

SAR Spezifische Absorptionsrate

EMF ElectroMagnetic Field: elektromagnetisches Feld

EMR ElectroMagnetic Radiations: elektromagnetische Strahlung

GMF GeoMagnetic Field. Erdmagnetfeld

PFD Power Flux Density, berechnet als $PFD = (V/m)^2/377$, in W/m^2

NIS Nichtionisierende Strahlung

SMF Static Magnetic Field: statisches Magnetfeld (Frequenz = 0 Hz)

WLAN (WIFI) Wireless Local Area Network (Wireless Fidelity): Informatik-Kommunikationsprotokoll zwischen 2,4 GHz und 5 GHz

Tabelle 1 Frequenzbereiche der NIS

Abkürzung	Bedeutung	Frequenz
TLF	tremendously low frequency	0 Hz bis 3 Hz
ELF	extremely low frequency	3 Hz bis 30 Hz
SLF	super low frequency	30 Hz bis 300 Hz
ULF	ultra low frequency	300 Hz bis 3 kHz
VLF	very low frequency	3 kHz bis 30 kHz
LF	low frequency	30 kHz bis 300 kHz
MF	medium frequency	300 kHz bis 3 MHz
HF	high frequency	3 MHz bis 30 MHz
VHF	very high frequency	30 MHz bis 300 MHz
UHF	ultra high frequency	300 MHz bis 3 GHz
SHF	super high frequency oder Zentimeterwellen	3 GHz bis 30 GHz
EHF	extremely high frequency oder Millimeterwellen	30 GHz bis 300 GHz

Einführung

Nichtionisierende Strahlung (NIS) wird als eine Reihe von Energiewellen beschrieben, die sich aus oszillierenden elektrischen und magnetischen Feldern zusammensetzen und sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Während ionisierende Strahlung aus den Atomen und Molekülen des Materials, das sie durchdringt, Elektronen entfernen kann, so gilt dies nicht für nichtionisierende Strahlung. NIS umfasst das Spektrum der Ultraviolettstrahlung (UV), des sichtbaren Lichts, der Infrarotstrahlung (IR), der Mikrowellenstrahlung (MW), der Hochfrequenzstrahlung (RF) und der Strahlung extremniedriger Frequenzen (ELF). Künstliche NIS tritt in einer Vielzahl von Kontexten auf und wird z. B. bei Hochfrequenzen für Mobiltelefonie, Rundfunk und WLAN verwendet. Stromleitungen senden niederfrequente NIS (50 Hz) aus. Je nach Frequenz und Intensität können NIS unterschiedliche Auswirkungen auf den Menschen haben. Aus diesem Grund wurden weltweit Beschränkungen der NIS-Exposition vereinbart. In der Schweiz sind die Beschränkungen der NIS, die von stationären Anlagen (z. B. Mobilfunksendeanlagen und Hochspannungsleitungen) ausgehen, in der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV 814.710) festgelegt. Diese Beschränkungen richten sich vor allem nach der Stärke des elektrischen Feldes und seiner Frequenz mit dem Ziel, die Menge der in das menschliche Gewebe eindringenden Energie zu begrenzen¹. Bei tragbaren Geräten wie Mobiltelefonen kann die Exposition durch die spezifische Absorptionsrate (SAR) beschrieben werden. Der SAR-Wert in W/kg gibt die Strahlungsleistung (W) an, die vom menschlichen Körper innerhalb eines gewissen Gewebevolumens (kg) absorbiert wird. Er wird für den menschlichen Körper unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des biologischen Gewebes berechnet. Bei mässig erhöhter Intensität kann NIS im RF-Bereich (30 MHz bis 300 GHz) eine thermische Wirkung hervorrufen, d. h. das biologische Gewebe erhitzen.

Viele Studien oder Literaturübersichten haben die gesundheitlichen Auswirkungen von NIS auf den Menschen zum Thema. Die Auswirkungen auf die Tierwelt, vor allem auf Insekten, sind jedoch noch unzureichend erforscht. Bestimmte Labor- und Feldstudien haben gezeigt, dass NIS das Verhalten oder die Physiologie gewisser Arthropoden beeinflussen kann. Diese Studien sind jedoch selten von ausreichender Qualität, um die Auswirkungen dieser Strahlung auf Physiologie, Ökologie und Biodiversität von Arthropoden im Allgemeinen abzuschätzen.

¹ In der NISV sind zwei Arten von Grenzwerten festgelegt: Einerseits die Immissionsgrenzwerte, die auf den Empfehlungen der Internationalen Kommission für den Schutz vor NIS (ICNIRP) basieren und überall dort einzuhalten sind, wo sich Menschen – auch nur für kurze Zeit – aufhalten können. Andererseits hat der Bundesrat auf der Grundlage des im Umweltschutzgesetz beschriebenen Vorsorgeprinzips Grenzwerte für die Versuchsanordnungen eingeführt. Diese sind strenger als die Immissionsgrenzwerte und sind überall dort einzuhalten, wo sich Menschen regelmässig über längere Zeit aufhalten (vor allem Wohnbereich, Schulen, Spitäler, Bürogebäude).

Dies verdeutlicht, wie wichtig eine qualitative Bewertung der aktuellen Literatur über die Auswirkungen von NIS wäre, um den Wissensstand zu bestimmen und Forschungslücken zu ermitteln.

Zu verschiedenen Themen in diesem Bereich wurden in den letzten Jahren in der Schweiz mehrere parlamentarische Vorstösse eingereicht: Interpellation (Ip) Wismer 19.4478 – «Insektensterben und Mobilfunkstrahlen», Ip Friedl 19.3345 – «Forschungsbedarf zu den Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern auf Tiere und Pflanzen» und die Frage von Reimann 18.5323 – «Sind elektromagnetische Felder zunehmend mitverantwortlich fürs Bienensterben?». Diese Fragen sind Teil eines breiteren politischen Kontextes, in dem es um die Bewertung der Faktoren geht, die den Rückgang der Biodiversität bei Arthropoden beschleunigen, was z. B. durch die Motion von Guhl «Das dramatische Bienen- und Insektensterben rasch und konsequent stoppen» veranschaulicht wird.

In seinen Stellungnahmen zu diesen Vorstössen weist der Bundesrat darauf hin, dass er nicht mit Sicherheit ausschliessen kann, dass die Strahlung von Mobiltelefonen und Basisstationen negative Auswirkungen auf Insekten hat. Er erwähnt jedoch, dass das Bienenforschungszentrum am Agroscope und die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft NIS als eine unwahrscheinliche Ursache für den starken Rückgang der Insekten ansehen [2]. Im Weiteren fügt der Bundesrat hinzu, dass für den Rückgang der Insekten der Verlust ihrer natürlichen Lebensräume, Schadstoffe, intensive Landwirtschaft und Lichtverschmutzung auf internationaler Ebene als Hauptursachen anerkannt sind [3]. Dennoch wird im jüngsten Bericht der Akademien der Wissenschaften Schweiz über den Stand der Insektenvielfalt in der Schweiz erwähnt, dass NIS zu den Faktoren zählen könnte, die Insekten möglicherweise beeinflussen können, aber noch unzureichend erforscht sind [4]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Forschung, um verlässliche Einschätzungen der Rolle von NIS bei den Veränderungen der Insektenpopulationen und ihrer Diversität vornehmen zu können. Bis vor kurzem wurde auch Lichtverschmutzung noch nicht als grösserer Störfaktor für die Biodiversität angesehen. Auch wenn negative Effekte der Lichtverschmutzung als gesichert gelten [125], steckt die Forschung zur Lichtverschmutzung noch in den Kinderschuhen, vor allem, wenn es darum geht, die Auswirkungen auf das Ökosystem zu verstehen. Ähnliches gilt auch für die NIS-Forschung.

Die Frequenzbereiche der für die Telekommunikation genutzten NIS ändern sich im Laufe der Zeit. So wird 5G in der Schweiz heute im sogenannten NR-FR1 (3.6 Ghz) Frequenzbereichen eingesetzt, die zuvor für die Mobiltelefonie oder WLAN genutzt wurden. Für zukünftige Anwendungen oder in einigen Städten wird 5G in höheren Frequenzbereichen getestet, die als Zentimeterwellen oder Superhochfrequenz bezeichnet werden (SHF, Frequenzen zwischen ca. 6 und 30 GHz) und Millimeterwellen oder extrem hohe Frequenzen (EHF,

Frequenzen zwischen 30 und 300 GHz). Die vom Bundesamt für Umwelt beauftragte Beratende Expertengruppe zu NIS, BERENIS, kam in ihrem im Juli 2020 veröffentlichten Informationsblatt zu dem Schluss, dass im Zusammenhang mit diesen Millimeterwellen besonders auf die ökologischen Auswirkungen zu achten ist und dass es in diesem Bereich noch Wissenslücken gibt [5].

Obwohl es einige Literaturübersichten zu diesem Thema gibt, so fehlt es doch an einem aktuellen und guten Überblick, der auf einer Methode zur systematischen Bewertung der Auswirkungen von NIS auf Arthropoden basiert. Ein Artikel über breitere ökologische Auswirkungen (auf Vögel, Insekten, Wirbeltiere, andere Organismen und Pflanzen) wurde 2013 publiziert [6]. In einem Artikel aus dem Jahr 2018 werden die wichtigsten Punkte angesprochen, die auf einer Online-Konferenz des EKLIPSE-Projekts (Akronym für Knowledge & Learning Mechanism on Biodiversity & Ecosystem Services) über die Auswirkungen von elektromagnetischer Strahlung auf die Tierwelt erörtert wurden [7], [8]. Im November 2019 hielt das «Bundesamt für Strahlenschutz» (BfS) in Deutschland einen internationalen Workshop zu den Auswirkungen von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern auf die Tierwelt ab. Seine allgemeine Schlussfolgerung lautet, dass es derzeit zwar keine soliden wissenschaftlichen Beweise für schwerwiegende negative Auswirkungen auf Flora und Fauna, jedoch aber entsprechende Hinweise gibt, die in einer weiteren Untersuchung zu klären wären. Das BfS ist daher der Auffassung, dass für Labor- und Feldexperimente die Entwicklung solider Protokolle notwendig ist und es Studien über die Wirkmechanismen bei den Auswirkungen von NIS auf Flora und Fauna dringend bedarf. Die Übersicht von Vanbergen et al. 2019 [7] und die Schlussfolgerungen aus dem BfS-Workshop liefern einige grundlegende Informationen, fassen sich jedoch hinsichtlich allgemeinem Kenntnisstand zu den Arthropoden und der diesbezüglichen Problematik eher kurz. Zudem handelt es sich dabei eher um eine Literaturzusammenstellung als um eine systematische Übersicht.

Vor kurzem hat das Europäische Parlament eine Literaturübersicht veröffentlicht, die sich speziell mit Insekten befasst [9]. Letztere bietet zwar einen Überblick über die vorhandene Literatur zu diesem Thema, weist jedoch methodische und analytische Mängel auf, und die Abhandlung wurde nicht in einer Zeitschrift mit Peer-Review-Verfahren veröffentlicht.

Ein solider, systematischer und wissenschaftlicher Literaturüberblick, der sich auf die Wirkung von NIS auf Arthropoden (vor allem Insekten) konzentriert, ist notwendig, um einen wissenschaftlich fundierten Überblick zu erhalten und eine begründete Diskussion über die Bedeutung dieser Forschung im Hinblick auf andere Umweltfaktoren führen zu können.

Das allgemeine Ziel dieses Berichts ist es, die potenziellen Auswirkungen von NIS auf Arthropoden, insbesondere bei hohen Frequenzen, zu bewerten. Genauer gesagt möchten wir Schlüsse über den Zusammenhang zwischen NIS-Exposition und gesundheitlichen Auswirkungen auf Arthropoden ziehen, indem wir Daten aus Tierstudien einbeziehen und die Ergebnisse der mehr theoretisch ausgelegten Studien berücksichtigen. Wir möchten die ermittelten Risiken auch in grösserem Massstab, d. h. auf der Ebene der Arthropodenpopulationen, des Ökosystems und der Landschaft, bewerten und vorhersagen.

Der vorliegende Bericht soll daher folgende Fragen beantworten:

1. Welche kurz- und mittelfristigen Risiken weisen die festgestellten potenziellen Auswirkungen auf Biodiversität und Umwelt auf?
2. Stellt die weit verbreitete Nutzung von Zentimeter-/Millimeterwellen der Mobilkommunikation eine erhebliche zusätzliche Gefahr dar?
3. Welche Studien sollten zu diesem Thema in Zukunft vorrangig durchgeführt werden?

Ferner sollte der Bericht Informationen zu folgenden Punkten beinhalten: Wirkungen, die durch wissenschaftliche Forschung ermittelt wurden, Art der untersuchten Exposition (Frequenzbereiche, Intensität, Modulation) und Qualität der Versuchsbedingungen. Er zeigt zudem auf, ob es konsistente Wirkungen gibt, die in mehreren Studien von guter oder mittlerer Qualität gefunden wurden, und ob selbst in lückenhaften Studien Wirkungen ermittelt wurden, deren Schadenspotenzial in ökologischer Hinsicht beträchtlich ist.

Methoden

Diese systematische Übersicht wurde an den OHAT-Ansatz für die systematische Überprüfung und Integration von Beweisen angepasst [10]. Vor allem wurden die Verfahren zur Bewertung der Studienqualität und des Vertrauens in die Gesamtheit der Nachweise (Schritte 4 und 5) geändert, um den Besonderheiten der ökologischen Studien Rechnung zu tragen. Diese Veränderungen werden untenstehend im Detail erläutert. Dieser Ansatz beschreibt ein Verfahren in 7 Schritten:

1. Formulierung der Problemstellung und Entwicklung des Protokolls
2. Suche und Auswahl der zu berücksichtigenden Studien
3. Erhebung der Studiendaten
4. Bewertung der Qualität der einzelnen Studien
5. Bewertung der Verlässlichkeit in die Gesamtheit der Nachweise
6. Übertragung der Verlässlichkeit der Nachweise in ein Evidenzgrad der gesundheitlichen Auswirkungen auf die Organismen. ²
7. Integration der Nachweise zur Erstellung von Schlussfolgerungen zur Ermittlung der Risiken. ²

² Diese Schritte werden in der Diskussion behandelt

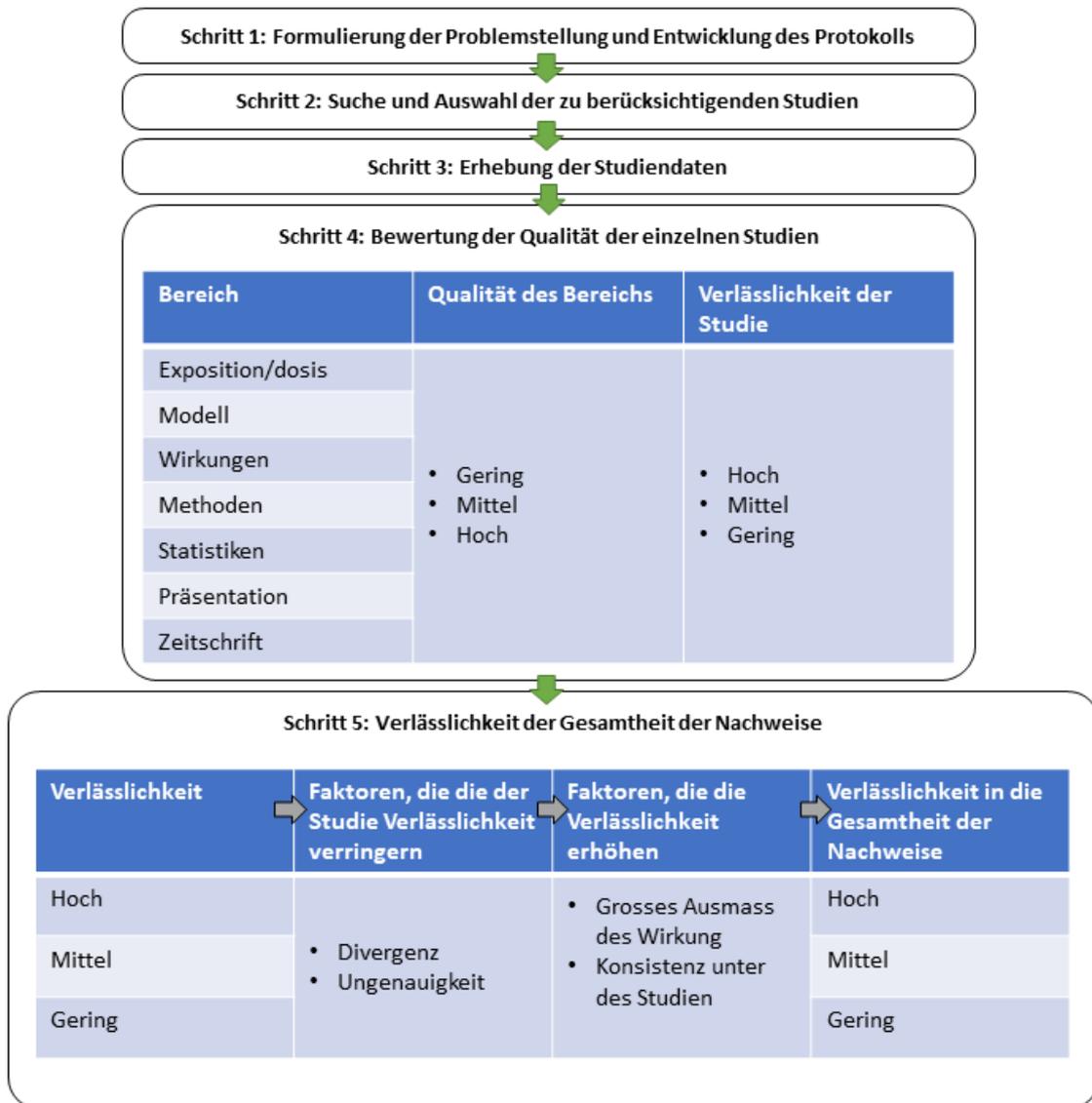


Abbildung 1 Methode der Suchstrategie, Studienauswahl, Bewertung der Studienqualität und Bewertung der Gesamtheit der Nachweise, angepasst nach Rooney et al. 2014 [10]

PECO-Formel (Schritt 1)

Die PECO-Formel gilt für die Forschung und für systematische Übersichtsarbeiten. Wir haben sie wie folgt festgelegt:

- Population: Wir haben die gesamte Literatur durchsucht und Studien berücksichtigt, in der die Wirkungen von NIS auf beliebige Arthropoden untersucht wurde. Dabei wurden Wirkungen auf der Ebene der Zellen, der Organismen, der Arthropoden-populationen oder der Ökosystemen berücksichtigt.
- Exposition: Wir haben alle NIS-Frequenzbereiche abgedeckt, von extrem niedrigen Frequenzen (ELF) bis 300 GHz.
- Vergleichskriterien (Comparators): Wir haben auch Studien berücksichtigt, in denen die Wirkung mit einer Gruppe ohne Exposition oder einer Gruppe mit geringerer Exposition verglichen wurde.
- Evaluationskriterien (Outcomes):
 - Überleben und Sterblichkeit (in allen Lebensstadien)
 - Subletale Effekte
 - Reproduktionsrate
 - Orientierung
 - Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten
 - Flugverhalten
 - Stoffwechsel und Körperfunktionen
 - Thermische Wirkung
 - Fortbewegungsgeschwindigkeit
 - Zirkadianer Rhythmus
 - Schädigung der DNA
 - Calciumkanäle
 - Zellstress
 - Populationsebene
 - Auswirkungen auf die Abundanz, die Populationsstruktur und das Geschlechterverhältnis
 - Ökosystemebene
 - Auswirkungen auf die Bodenfunktion und die damit verbundenen trophischen Netzwerke
 - Auswirkung auf die Bestäubung
 - Unterschiedliche Auswirkungen auf verschiedene Funktionsgruppen (welche Gruppe ist empfindlicher als andere)

Die PECO-Formel für diese Studie wird in untenstehender Tabelle zusammengefasst.

Probanden	Arthropoden
Exposition	NIS-Exposition im Experiment oder bei Beobachtungen
Vergleichskriterien (Comparators)	Kontroll- oder Dosis-Wirkungs-Gruppe
Evaluationskriterien (Outcome)	Reproduktionsrate, Orientierung, Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten, Flugverhalten, Stoffwechsel und Körperfunktionen, Thermische Wirkung, Fortbewegungsgeschwindigkeit, Zirkadianer Rhythmus, Schädigung der DNA, Calciumkanäle, Zellstress

Festlegung der Schlüsselwörter und Suchkriterien

Ausgehend von der PECO-Formel haben wir folgende Schlüsselwörter festgelegt:

Schlüsselwörter NIS: EMF, EMD, EMR, Magnetic Field, electromagnetic, radiofrequencies, wireless, 3G, 4G, 5G, UMTS, LTE, WIFI WLAN, radiation

Schlüsselwörter bezüglich Organismen: arthropods, insects

Schlüsselwörter bezüglich Wirkungen: reproduction, lifecycle, orientation, foraging, assimilation, flight, behavior, cycle, DNA, chromosome, stress, nerve, thermal, CCD, abundance, structure

Wir haben die Suche auf Scopus und Pubmed am 02. Juni 2021 als Multifieldersuche durchgeführt.

(EMF OR EMD OR EMR OR Magnetic Field OR electromagnetic OR radiofrequencies OR wireless OR 3G OR 4G OR 5G OR UMTS OR LTE OR WIFI OR WLAN OR radiation) AND (arthropods OR insects) AND (reproduction OR lifecycle OR orientation OR foraging OR assimilation OR flight OR behavior OR cycle OR DNA OR chromosome OR stress OR nerve OR thermal OR CCD OR abundance OR structure)

Um die Reichweite der Suchergebnisse zu erhöhen, haben wir zudem Artikel berücksichtigt, die die bei der Suche gefundenen Artikel zitieren, sowie Artikel, die von den bei der Suche gefundenen Artikeln zitiert werden.

Ein- und Ausschlusskriterien (Schritt 2)

Wir haben alle Studien berücksichtigt, in denen eine Wirkung von NIS auf Arthropoden auf der Ebene des Individuums, der Population oder des Ökosystems untersucht wird. Für diese systematische Übersicht wurden nur experimentelle oder beobachtende Studien berücksichtigt, in denen die Wirkung von NIS auf Arthropoden getestet wurde. Buchkapitel, Berichte und systematische Übersichtsarbeiten wurden bei der Erörterung berücksichtigt, aber nicht in den Hauptteil dieser systematischen Übersicht aufgenommen, wie es bei systematischen Übersichtsarbeiten üblich ist, da es sonst zu einer Redundanz der untersuchten Literatur käme. Artikel aus der Physik (Absorptionsmodelle), in denen die theoretischen Prozesse von NIS an biologischen Geweben untersucht werden, wurden bei der Erörterung berücksichtigt, aber nicht in den Hauptteil dieser systematischen Übersicht aufgenommen, da in ihnen die Wirkungen nicht direkt untersucht oder getestet werden.

Die Suchergebnisse wurden in ein Literaturdaten-Management Programm für systematische Reviews (Rayyan) importiert, um Duplikate zu löschen und relevante Studien auszuwählen. Jeder Kurator (insgesamt 3 Kuratoren) war gegenüber den Entscheidungen der anderen blind. Nach Aufhebung der Verblindung wurden die Abweichungen in Gesprächen unter den Kuratoren geklärt.

Obwohl wir *a priori* keinen Grenzwert für die Expositionsintensität in den Einschlusskriterien festgelegt hatten, haben wir während des Auswahlprozesses entschieden, eine Gruppe von Studien auszuschliessen, in denen die Verwendung von NIS als dielektrisches Heizmedium für Arthropoden zur Sterilisation von Lebensmittelvorräten untersucht wurde. Diese Studien waren aufgrund der sehr hohen Expositionswerte, die die Umweltexposition, der Arthropoden ausgesetzt sein können, bei weitem übertreffen, für die in diesem Bericht angesprochene Problematik nicht relevant. Auf diesen Aspekt gehen wir im **Ergebnisteil** ausführlicher ein.

Datenerhebung (Schritt 3)

Für jede ausgewählte Studie haben wir folgende Daten extrahiert:

- Zielorganismus
- Kategorie des NIS-Frequenzbereich
- Intensität der NIS-Exposition

- Gemessene Wirkung und betroffenes Lebensstadium
- Grenzen der Studie

Qualitative Bewertung der ausgewählten Studien (Schritt 4)

Um die Zuverlässigkeit der ausgewählten Artikel einzuschätzen, haben wir ihre Qualität bewertet. Aufgrund der Art der Studien war es nicht möglich, die herkömmlichen verfügbaren Tools zur Bewertung des Risikos von Verzerrungen zu verwenden, auch nicht die für Tierstudien entwickelten Tools wie SYRCLE [11]. Diese Tools wurden hauptsächlich für Säuge- oder Wirbeltiere konzipiert, für die strenge Vorschriften für medizinische oder ökotoxikologische Studien gelten. Studien an Arthropoden unterliegen nicht solchen Regeln und Protokollen, z. B. in Bezug auf Zufallszuweisungen, Verblindung, Züchtung von Organismen etc. Wären wir gezwungen gewesen, ein solches Tool zur Ermittlung des Verzerrungsrisikos einzusetzen, so wären alle ausgewählten Studien als verzerrt oder stark verzerrt markiert worden. Daher haben wir ein Bewertungssystem eingeführt, das auf dem von der beratenden Expertengruppe zu NIS, BERENIS, verwendeten Bewertungsraster für die Studienqualität beruht (siehe Anhang 2). Anstelle einer strikten Ermittlung der Verzerrung haben wir eine Qualitätsbewertung durchgeführt, bei der das Gesamtdesign der Studie in Bezug auf Verzerrung, Statistik und Forschungsdesign berücksichtigt wurde. Wir haben daher ein Hybridschema aus Verzerrungsanalyse und Qualitätsbewertung genutzt, um für jede Studie einen Verlässlichkeitsgrad zu ermitteln, der direkt in die Ermittlung der Verlässlichkeit der Gesamtheit der Nachweise einfließt (Schritt 5).

Wir haben 3 Bewertungsbereiche festgelegt, die im Folgenden beschrieben werden: Exposition/Dosis, Methoden, Statistik. Der Bereich *Exposition/Dosis* richtet sich nach Definition, Messung und Relevanz der NIS-Exposition. Der *Methodenbereich* richtet sich nach dem Gesamtstudienkonzept und soll ermitteln, ob das Gesamtstudiendesign zur Beantwortung der untersuchten Frage geeignet ist. Der *Statistikbereich* dient der Überprüfung, ob die in der Studie benutzten Statistiken relevant und korrekt sind.

Für jeden dieser drei Bewertungsbereiche wurde eine Liste von Fragen ausgearbeitet, für die eine positive Antwort 1 Punkt und eine negative Antwort 0 Punkte für den Bereich bringt. Je nach erreichter Punktzahl kann die Qualität der einzelnen Bereiche mit «gering», «mittel» oder «hoch» bewertet werden, mit Ausnahme des Bereichs «Statistik», der nur die Werte «gering» oder «hoch» annehmen kann. Das vollständige Bewertungssystem ist in Anhang 2 dargelegt.

Ausgehend von der Qualität jedes dieser 3 Bereiche wird jeder einzelnen Studie ein Verlässlichkeitsindex zugewiesen. Das Gesamtverlässlichkeit in eine Studie entspricht der schlechtesten Qualität in einem der drei bewerteten Bereiche.

Vor diesem Hintergrund spiegelt das Vertrauen in eine bestimmte Studie die Wahrscheinlichkeit wider, dass die in der Studie ermittelten Wirkungen nahe an den realen Wirkungen liegen, die in der Studie bewertet werden sollen.

Abschätzung der Verlässlichkeit der Gesamtheit der Nachweise (Schritt 5)

Angesichts der Heterogenität der Expositionen, der Organismen und der Bewertungskriterien der verschiedenen Studien war es uns nicht möglich, eine Metaanalyse durchzuführen. Daher haben wir die Ergebnisse wie vom OHAT empfohlen in Erzählform zusammengefasst. In diesem Schritt soll die Standardfrage beantwortet werden: «Wie gross ist im Frequenzbereich von X Hz bis Y Hz die Verlässlichkeit für eine Wirkung von NIS auf das Ergebnis Z?». Dieses Ergebnis Z meint eines der Outcomes, die anhand der PECO-Formel festgelegt wurden: Überleben, Verhalten etc.

Wir haben 3 Kategorien von NIS-Frequenzen definiert: 0 – 100kHz, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz – 300 GHz. Wir haben das Vertrauen in die in den Studien aufgeführten Ergebnisse für jede dieser Kategorien durch Schätzung der Qualität der Gesamtheit der Nachweise wie in Rooney et al. beschrieben ermittelt. (2014) [10]. Für jedes in Schritt 1 festgelegte Bewertungskriterium (outcome) wird das Vertrauen in die Gesamtheit der Nachweise unter Berücksichtigung der Stärken und Schwächen einer Sammlung von Studien beurteilt. Die genutzte und im Folgenden dargestellte Methodik orientiert sich an der GRADE-Methode, wurde aber angepasst, um den Besonderheiten der berücksichtigten Studien Rechnung zu tragen, die nicht die für die Anwendung von GRADE erforderlichen Merkmale aufweisen. Für jedes Ergebnis und jede NIS-Kategorie erhalten die Studien einen Index der anfänglichen Verlässlichkeit, wie in Schritt 4 erläutert. Danach wird jedem Bewertungskriterium in jedem NIS-Bereich eine Gesamtverlässlichkeit zugewiesen, die auf die Verlässlichkeit in die Studien beruht, die sich mit dem Ergebnis in dem jeweiligen Bereich befassen. Die anfängliche Verlässlichkeit entspricht der höchsten Note aus mindestens 2 Studien. Liegen mindestens 2 Studien vor, so wird die Verlässlichkeit als niedriger als die höchste Verlässlichkeit der berücksichtigten Studie eingestuft. Infolgedessen kann eine einzelne Studie einen geringeren Verlässlichkeitsgrad aufweisen als eine Sammlung von Studien, die zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommen. Die Note kann im Anschluss nach oben oder unten angepasst werden. Die Note wird über ein Punktesystem nach oben oder unten angepasst. Wenn 5 Studien von mindestens 2 verschiedenen Forschungsgruppen zu ähnlichen Schlüssen kommen, wird 1 Punkt vergeben. Wenn in mindestens zwei Studien eine Dosis-Wirkungs-Beziehung nachgewiesen wird, wird 1 Punkt vergeben. Wenn in zwei Studien strikt

widersprüchliche Wirkungen gezeigt werden, wird 1 Punkt abgezogen. Wenn mehr als zwei Studien nicht schlüssig sind, wird 1 Punkt abgezogen. Wenn die Gesamtpunktzahl positiv ist, wird der endgültige Verlässlichkeitgrad durch Erhöhung des anfänglichen Verlässlichkeitgrad ermittelt. Wenn die Gesamtpunktzahl negativ ist, wird der endgültige Verlässlichkeitgrad durch Absenken des anfänglichen Verlässlichkeitgrad ermittelt.

Ergebnisse

Auswahl der Studien, Datenerhebung und qualitative Bewertung

Die erste Suche ergab 4409 Literaturzitate, von denen 422 doppelt vorhanden waren. Von den verbleibenden Artikeln wurden 3.658 anhand des Titels und der Zusammenfassung auf der Plattform Rayyan als irrelevant angesehen. Zu den irrelevanten Studien zählen beispielsweise eine Studie mit der Beschreibung eines Roboters, der ein Insekt nachbildet [12], oder eine Studie zur Begutachtung von Pestiziden [13]. Unter den 329 verbleibenden Artikeln erfüllten 127 die Einschlusskriterien vollständig und wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Bei den 201 ausgeschlossenen Artikeln handelte es sich etwa zur Hälfte um Übersichtsarbeiten, Buchkapitel oder Studien, bei der die Wirkung von NIS auf Arthropoden nicht getestet wurde (z. B. Studien an Wirbeltieren). Bei der anderen Hälfte handelte es sich um Studien zur Nutzung von Mikrowellen als Wärmequelle zur Bekämpfung von Insekten und Schädlingen in Getreidelagern [14], [15]. Obwohl wir im Vorfeld keine Expositionsgrenze festgelegt hatten, haben wir uns beim Auswahlprozess dafür entschieden, diese Studien nicht in die Untersuchung aufzunehmen, wie unter **Methoden** erläutert.

Diese Studien mit RF als Mittel zur Schädlingsbekämpfung in Lebensmittellagern zielen darauf ab, die Temperatur der Arthropoden schnell, meist für einige Minuten auf über 60 °C, zu erhöhen, um Kulturen oder Früchte zu desinfizieren [16], [17]. Unter diesen Bedingungen wird in diesen Studien lediglich der Temperaturanstieg gemessen, der durch eine RF-Belastung mit hoher Intensität verursacht wird. Das Ziel dieser Studien besteht zudem darin, die optimale Temperatur und Erwärmungszeit zu ermitteln, um Arthropoden wirksam zu vernichten. In einzelnen Studien wurde diese Wirkung sogar an Larven im Mikrowellengerät untersucht [18]. In einigen Studien werden die verwendeten Expositionen angegeben. Die dort beschriebenen Expositionen liegen jedoch weit über den umweltrelevanten Expositionswerten. Es wurde z.B. beschrieben, dass Expositionen von ca. 300 kV/m bei 47,5 MHz in einer Kornkäferprobe 90 % der Tiere innerhalb von 60 Sekunden abtöten [19], während die in der NISV festgelegten Immissionsgrenzwerte für diese Frequenzen bei 26 V/m liegen, also 10.000-mal niedriger.

127 beobachtungsorientierte oder experimentelle Studien, in denen eine Wirkung ermittelt wurde, wurden in die Auswertung aufgenommen.

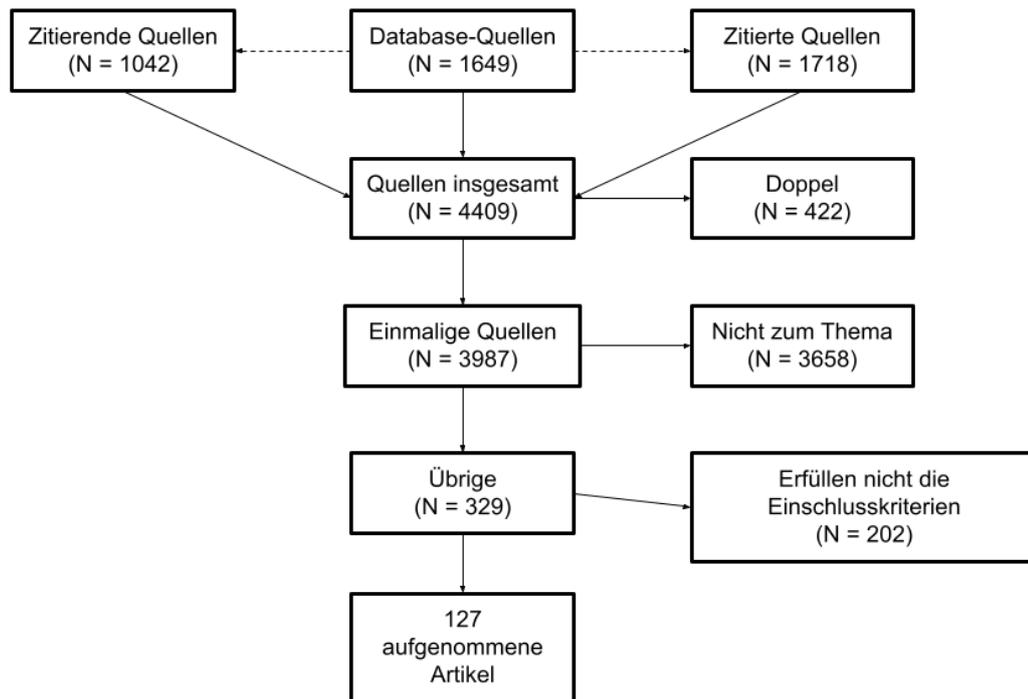


Abbildung 2 Recherche und Auswahl der Studien

Die Qualität der 127 ausgewählten Artikel wurde mithilfe unserer Qualitätsbewertungsskala bewertet, die im Abschnitt **Methoden** erläutert wird. Obwohl die meisten Artikel aus methodologischer und statistischer Sicht von ausreichender Qualität sind, fehlt es oft an einer korrekten Definition und/oder Messung der Exposition. Daher ist es schwierig, die Dosis/Exposition, der die Modellorganismen ausgesetzt waren, zuverlässig zu ermitteln. So kann man in Studien, die über Dosis-Wirkungs-Reaktionen berichten, zwar die Richtung einer Wirkung bewerten, jedoch ist ein Vergleich der realen Expositionintensität zwischen den Studien schwierig.

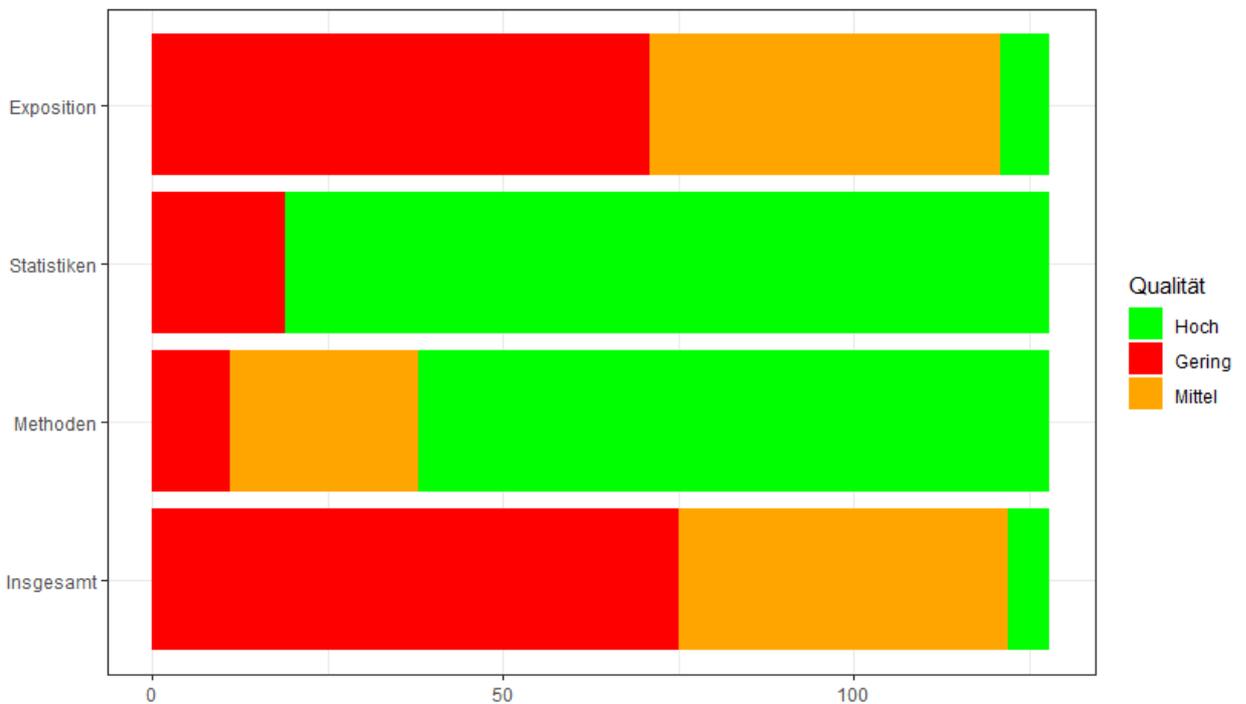


Abbildung 3 Verteilung der Qualität ausgewählter Kriterien in jeder Studie. Die Balken zeigen die Verteilung der Qualität der Kriterien nach Studien an. Bei rund 60 % der Studien ist das experimentelle Design unvollkommen, was eine geringe Qualität des Kriterium «Exposition» zur Folge hat.

Insgesamt wurden die meisten Studien (75/127) in die Verlässlichkeitskategorie «gering» eingestuft. 47 wiesen eine mittlere und sechs eine hohe Qualität auf. Nur in einer Studie von ausreichender Qualität (nicht mit «gering» bewertet) wurden Wirkungen bei Frequenzen über 6 GHz festgestellt. [20]

Tabelle 2 Anzahl der Studien nach Frequenzbereich und Einstufung nach Qualität. Die Gesamtsumme ist grösser als die Gesamtzahl der Studien, da einige Studien mehrere Frequenzbereiche abdecken.

Frequenz	Globaler Verlässlichkeitsindex			Gesamt
	Gering	Mittel	Hoch	
0 Hz – 100 kHz	43	28	5	76
100 kHz – 6 GHz	26	20	1	47
6 GHz – 300 GHz	8	1	0	9
Gesamt	77	49	6	132

Wirkung auf Arthropoden

Die 127 ausgewählten Studien behandeln über vierzig Arten. Die genaue Zahl ist nicht bekannt, da in mehreren Studien nur vage von «Honey bees» oder «wild pollinators» die Rede ist. Die am besten untersuchte Ordnung ist die der Zweiflügler, aufgrund der Verwendung von *Drosophila melanogaster* als Tiermodell. Die Hautflügler sind die am zweithäufigsten untersuchte Gruppe, da es viele Studien über Bienen und eine über Bestäuber allgemein gibt.

Tabelle 3 Anzahl der Studien in verschiedenen systematischen Kategorien und NIS-Frequenzbereichen

Klasse	Ordnung	Familie	Organismus	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz – 100 kHz	Zwischen-summe
Malacostraca	Amphipoda	Pontogeneiidae	<i>Gondogeneia antarctica</i>	1	0	0	
		Gesamt		1	0	0	1
	Isopoda	Porcellionidae	<i>Porcellio laevis</i>	0	0	1	
		Gesamt		0	0	1	1
	Gesamt		1	0	1	2	
Arachnida	Amblypygi	Phrynidae	<i>Paraphrynus laevifrons</i>	1	0	0	
		Gesamt		1	0	0	1
	Araneae	Araneidae	<i>Araneus diadematus</i>	0	1	0	
		Gesamt		0	1	0	1
	Gesamt		0	2	0	2	
Collembola	Poduromorpha	Isotomidae	<i>Folsomia candida</i>	1	0	0	
		Gesamt		1	0	0	1
	Gesamt		1	0	0	1	
Insecta	Blattodea	Blaberidae	<i>Blaptica dubia</i>	0	0	1	
		Ectobiidae	<i>Blattella germanica</i>	0	0	1	
		Blattidae	<i>Periplaneta americana</i>	1	0	4	
		Rhinotermitidae	<i>Coptotermes formosanus</i>	1	0	0	
			<i>Heterotermes indicola</i>	0	0	1	
		Gesamt		10	4	10	24
	Coleoptera	Cerambycidae	<i>Morimus funereus</i>	0	0	4	
		Chrysomelidae	<i>Caryedon gonagra</i>	1	0	0	
		Tenebrionidae	<i>Tenebrio sp.</i>	0	0	1	
			<i>Tenebrio molitor</i>	1	1	2	
		Gesamt		2	1	7	10
	Diptera	Calliphoridae	<i>Calliphora sp.</i>	0	0	1	
		Culicidae	<i>Aedes aegypti</i>	1	1	0	

Klasse	Ordnung	Familie	Organismus	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz – 100 kHz	Zwischen-summe
		Drosophilidae	<i>Drosophila melanogaster</i>	19	4	13	
			<i>Drosophila melanogaster (Strain Oregon-R)</i>	0	1	2	
			<i>Drosophila sp.</i>	3	0	3	
			<i>Drosophila subobscura</i>	0	0	3	
			<i>Drosophila virilis</i>	1	0	0	
		Muscidae	<i>Musca domestica</i>	0	0	2	
		Gesamt		24	6	24	
	Hemiptera	Anthocoridae	<i>Orius laevigatus</i>	1	0	0	
		Aphididae	<i>Sitobion avenae</i>	0	0	1	
		Cicadellidae	<i>Nephotettix virescens</i>	0	0	1	
		Delphacidae	<i>Nilaparvata lugens</i>	0	0	1	
		Pyrrhocoridae	<i>Pyrrhocoris apterus</i>	1	0	0	
		Gesamt		2	0	3	
	Hymenoptera	Apidae	<i>Apis mellifera</i>	6	0	8	
			<i>Apis mellifica carnica</i>	0	0	1	
			bee	1	0	2	
			honey bee queen	1	0	0	
		Braconidae	<i>Asobara japonica</i>	1	0	0	
		Formicidae	<i>Formicidae sp.</i>	2	0	0	
			<i>Ectatomma brunneum</i>	0	0	1	
			<i>Myrmica sabuleti</i>	2	0	0	
			<i>Pachycondyla villosa subsp. inversa</i>	0	0	1	
			<i>Pheidole sp.</i>	0	0	1	
		Vespidae	<i>Solenopsis sp.</i>	0	0	1	
	Gesamt		13	0	17	30	
	Ixodida	Ixodidae	<i>Dermacentor reticulatus</i>	1	0	0	
			<i>Ixodes ricinus</i>	0	1	0	
		Gesamt		1	1	0	
	Lepidoptera	Erebidae	<i>Lymantria dispar</i>	0	0	2	
		Noctuidae	<i>Helicoverpa armigera</i>	1	0	0	
<i>Spodoptera litura</i>			0	0	1		
<i>Trichoplusia ni</i>			0	0	1		
Pyralidae		<i>Ephestia kuehniella</i>	0	0	1		
Gesamt		1	0	5	6		

Klasse	Ordnung	Familie	Organismus	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	0 Hz – 100 kHz	Zwischen-summe
	Orthoptera	Acrididae	<i>Schistocerca gregaria</i>	0	0	2	
		Gesamt		0	0	2	2
	Phasmida	Phasmatidae	<i>Medauroidea extradentata</i>	0	0	1	
		Gesamt		0	0	1	1
	NA	NA	Insecta sp.	0	0	2	
	NA	NA	Insecta sp. (Wasserbewohner)	0	0	1	
	NA	NA	Insecta sp. (wildlebende Bestäuber)	1	0	0	
		Gesamt		53	12	69	134

In den ausgewählten Studien wurden Wirkungen in 13 Kategorien untersucht:

- Überlebens- und Sterblichkeitsrate (14 Studien)
- Fortpflanzung (35)
- Schädigung der DNA (17)
- Verhalten (33)
- Zirkadianer Rhythmus (2)
- Flugverhalten (5)
- Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten (6)
- Orientierung (11)
- Wirkung auf die Körperfunktionen und den Stoffwechsel im Allgemeinen (10)
- Thermische Wirkung (2)
- Fortbewegungsgeschwindigkeit (13)
- Zellstress (14)
- Population (4)

Die meisten Artikel berichten über Auswirkungen auf die Reproduktionsrate und Verhalten im Allgemeinen. Auf Zellebene wurden weniger Studien durchgeführt, mit Ausnahme von Studien zu DNA-Schädigungen oder Zellstress-Biomarker. Für jede Studie haben wir angegeben, ob die experimentelle Exposition über oder unter den Immissionsgrenzwerten lag (ICNIRP-Grenzwerte, die in der NISV als Immissionsgrenzwerte übernommen wurden).

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse in Tabellen mit folgenden Spaltenüberschriften zusammengefasst:

- Ref: Quelle der Studie
- NIS-Bereich: in der Studie berücksichtigter NIS-Bereich

- Dosis: Intensität der Exposition laut Studie, je nach Angaben entweder als elektrische oder magnetische Feldstärke oder als SAR-Wert.
- Exposition: Angabe, ob die in der Studie verwendete Exposition über oder unter den Grenzwerten liegt. Der SAR-Grenzwert liegt bei 0,4 W/kg bei Ganzkörperexposition und bei 2 W/kg bei lokaler Exposition [21].
- Organismus: untersuchte(r) Arthropode(n)
- Wirkung: in der Studie beschriebene Wirkung von NIS
- Richtung: Richtung der Wirkung (neg: negativ, pos: positiv, incl: nicht schlüssig). Die Begriffe «negativ» und «positiv» stehen stets für «potenziell schädlich» oder «nicht schädlich» für die betreffenden Arthropoden. Eine berichtete negative Wirkung bei Zellstress entspricht also einem Anstieg der Zellstressmarker, die potenziell schädlich wirken. Bei einer nicht schlüssigen Studie wurde mit dem verwendeten experimentellen Design keine statistisch signifikante Wirkung gefunden. Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass es keine Wirkung gibt, sondern, dass die Wirkung zu gering ist, um mit dem experimentellen Design der Studie nachgewiesen werden zu können.
- Erweiterter Bereich: in der Studie berücksichtigter NIS-Bereich (0 – 100kHz, 100 kHz – 6 GHz, 6 GHz – 300 GHz)
- Verlässlichkeit: Vertrauen in die Studie gemäss Erläuterung in Schritt 4
- Gesamtverlässlichkeit : das Vertrauen bezüglich der Wirkung einer Exposition im jeweiligen NIS-Bereich auf das jeweilige Ergebnis (outcome).

Überlebens- und Sterblichkeitsrate

14 Studien haben Wirkungen auf die Überlebens- oder Sterblichkeitsrate gezeigt. Neun Studien berichten über negative Wirkungen, zwei über positive Wirkungen und zwei weitere sind nicht schlüssig. Die meisten Studien befassen sich mit *Drosophila melanogaster*.

Tabelle 4 - Auswirkungen von NIS auf Überleben und Sterblichkeit von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	1	1		2
<i>Apis mellifica carnica</i>	1			1
<i>Drosophila melanogaster</i>	4	2	2	8
<i>Musca domestica</i>	1			1
<i>Tenebrio molitor</i>	1			1
Gesamt allgemein	8	3	2	13

Im Bereich 0 kHz - 100 kHz ist das Verlässlichkeit in die Gesamtheit der Nachweise mittel, da es Diskrepanzen zwischen den Studien gibt. Einige (4) zeigen eine negative Wirkung der NIS-

Exposition auf das Überleben (erhöhte Sterblichkeit oder verkürzte Lebensdauer), andere (2) zeigen eine positive Wirkung (erhöhte Lebensdauer) [22], [23] und zwei weitere sind nicht eindeutig aufgrund inkonsistenter oder nicht signifikanter Ergebnisse [24], [25]. Darüber hinaus war in diesem Frequenzbereich in zwei Studien keine angemessene Exposition definiert. Eine wies eine Intensität von 7-35 kV/m bei 50/60 Hz auf, somit über den in der Schweiz vorgeschriebenen Grenzwerten liegt. In diesem Frequenzbereich berichtet Ramirez (1983) von einer relativen Übersterblichkeit von Larven und Puppen bei *D. melanogaster* in Höhe von rund 20-30 % im Vergleich zur Kontrollgruppe bei einer Exposition von mehreren Tagen. Ein möglicher Mechanismus, der vom Verfasser angeführt wird, ist eine Glykosaminoglykan-Störung durch NIS [26], [27].

Zwischen 100 kHz und 300 GHz gibt es schwache Hinweise auf eine negative Wirkung der NIS-Exposition auf das Überleben (erhöhte Sterblichkeit oder verkürzte Lebensdauer). Diese wurden in sechs Studien [28]-[33] berichtet, darunter zwei mit Expositionsbedingungen über dem regulatorischen Schwellenwert [30], [33] und eine mit einer nicht klar definierten Exposition. [31]. Sudaryadi (2020) [28] berichtet für *D. melanogaster* über einen relativen Abfall der Überlebensrate um etwa 30 % nach 6-stündiger Exposition mit 4G (Exposition in der Studie nicht klar definiert). Darney (2016) berichtet über einen Anstieg der Sterblichkeit bei *Apis mellifera* von 7 % in der Kontrollgruppe auf 15 % nach 8-stündiger, gepulster Exposition mit Frequenzen von 13,56 MHz und 868 MHz. Die thermische Wirkung wird in dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt. Weder in der einen noch in der anderen Studie wird ein Mechanismus zur Erklärung der erhöhten Sterblichkeit angeführt.

Für 35 GHz zeigt Shckorbatov (2007) [32] auf, dass eine relative Verringerung der Schlupfrate um etwa 20 % bei *D. melanogaster* mit einer erhöhten Anzahl von tödlichen Mutationen bei *Drosophila* einhergeht. Der Anteil der Mutationen steigt mit der Expositionsintensität von 10 % auf 25 % zwischen 0 mW/cm² und 265 mW/cm². Shakina (2011) zeigt in einer Studie von mittlerer Verlässlichkeit, dass eine relative Verringerung der Schlupfrate mit einer erhöhten Anzahl von letalen Mutationen bei *Drosophila* einhergeht. [20]. Details siehe Tabelle 14.

Fortpflanzung

In 35 Studien, verteilt über das gesamte Frequenzspektrum von 0 Hz bis 36 GHz, wird über eine Wirkung auf die Reproduktion berichtet. 28 Studien berichten über negative Wirkungen, zwei über positive Wirkungen und fünf sind nicht eindeutig. Die meisten Studien befassen sich mit *Drosophila melanogaster*. Die Details der untersuchten Entwicklungsstadien sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 5 Auswirkungen von NIS auf die Fortpflanzung von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>		2		2
<i>Blaptica dubia</i>	1			1
<i>Droso Oregon-R</i>	1			1
<i>Drosophila melanogaster</i>	5	13	2	20
<i>Drosophila virili</i>		1		1
<i>Drosophila oregon</i>			1	1
<i>Drosophila sp.</i>	1	1		2
<i>Asobara japonica</i>		1		1
<i>Orius laevigatus</i> ,		1		1
<i>Folsomia candida</i>		1		1
<i>Heterotermes indicola</i>	1			1
<i>honey bee queen</i>		1		1
<i>Rhyzopertha dominica</i>	1			1
<i>Spodoptera litura</i>	1			1
<i>Tenebrio molitor</i>			2	2
<i>Trichoplusia ni</i>	1			1
Gesamt allgemein	12	21	5	38

Zwei Studien haben eine positive Wirkung auf die Reproduktionsrate gezeigt. Sheiman (2003) [34] berichtete, dass schwache EMF (36 GHz, 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) die Verpuppung und Häutung von *Tenebrio molitor* stimulierten, uns liegen jedoch keine Informationen über die Lebensfähigkeit der adulten Individuen vor. Zudem ist diese Studie von geringer Qualität und die Grössenordnung der Wirkung wird nicht angegeben. Weisbrot (2003) [35] berichtet über einen relativen Anstieg der Fortpflanzungsrate um ca. 20 % bei *D. melanogaster* bei einer Exposition mit 900-1900 MHz und 20-63 V/m. Da dieser Anstieg jedoch mit einer Zunahme der Zellstressmarker (HSP70 usw.) einhergeht, können wir nicht ausschliessen, dass der Anstieg der Nachkommenschaft eine Folge von Zellstress und keine positive Wirkung der NIS-Exposition ist. Die Autoren legen darüber hinaus nahe, dass der Anstieg wahrscheinlich auf eine Zunahme der Eiablage und nicht auf einen Anstieg der Schlupfrate zurückzuführen ist, jedoch sind keine Daten angegeben.

Für Frequenzbereiche von 0 bis 6 GHz wurde in 14 Studien von mittlerem Verlässlichkeitsgrad über negative Wirkungen berichtet, darunter vor allem über eine geringere Schlupfrate der Eier und verringerte Körpermasse der Nymphen (Puppen). Odemer (2019) berichtet zudem über eine relative Verringerung der Schlupfrate zukünftiger Königinnen von 44% bei *Apis mellifera* nach einer Exposition der Eier mit 900 MHz und 0,005-5 V/m [36]. Diese Wirkungen werden manchmal mit einer Schädigung der DNA in Verbindung gebracht [37] – [39]. Bei Exemplaren von *Drosophila melanogaster*, deren Eier 900 MHz bei 17 V/m ausgesetzt waren, wurde eine Schrumpfung der Eierstöcke um 18 % berichtet, zusammen mit einer Zunahme der DNA-Schädigungen [38]. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse legen die Autoren nahe,

dass die NIS-Exposition in ihrer Versuchsanordnung eine DNA-Schädigung in den Eiern zur Folge hat, die den Fortpflanzungserfolg beeinträchtigt. Die Wirkung von NIS auf die Fortpflanzung ist ziemlich klar erwiesen bei einer hohen Verlässlichkeit aufgrund der Übereinstimmung vieler Studien und scheint mit einer DNA-Schädigung und einer Zunahme apoptotischer Prozesse einherzugehen [40]. Ein von Lee (2008) vorgebrachter Mechanismus ist die Störung der Mitose über den MAPK-Signalweg, dessen Aktivierung nach einer Exposition mit 835 MHz (SAR 4,0 W/kg) nachgewiesen wurde [30]. Diese Störung der Mitose macht sich auch im Abbau des Aktin-Zytoskeletts bemerkbar [37]. Zu beachten ist, dass in den Studien in diesem Frequenz-bereich mehrheitlich (16/30) Expositionen unterhalb der regulatorischen Grenzwerte getestet wurden.

Der mittlere Verlässlichkeitsgrad bei einer Wirkung oberhalb von 6 GHz ist vor allem auf den Mangel an verfügbaren Studien von guter Qualität zurückzuführen. Referenzen und Details zu den Expositionen und Wirkungen siehe Tabelle 3.

Schädigung der DNA

In 17 Studien wurde die DNA-Schädigung durch NIS-Exposition von 0 Hz bis 36,6 GHz untersucht. 13 berichten über negative Wirkungen und vier sind nicht schlüssig, obwohl eine Exposition oberhalb des aktuellen regulatorischen Grenzwerts getestet wurde [41]-[44]. Der am häufigsten untersuchte Organismus ist *Drosophila melanogaster*.

Tabelle 6 Auswirkungen von NIS auf DNA Schäden bei Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Gesamt allgemein	
<i>Apis mellifera</i>			1	1	
<i>Drosophila melanogaster</i>	3	6	3	12	
<i>Drosophila sp.</i>			2	2	
<i>Ephestia kuehniella</i>	1			1	
<i>Trichoplusia ni</i>	1			1	
Gesamt allgemein		5	9	3	17

Hier bezieht sich «DNA-Schädigung» auf jede beschriebene Schädigung an der DNA. Die Verlässlichkeit liegt für Frequenzen unter 100 kHz im mittleren Bereich, wobei in vier von fünf Artikeln eine Exposition über den gesetzlichen Grenzwerten getestet wurde. Das Vertrauen in die Nachweise ist zwischen 100 kHz und 6 GHz hoch. Zwei ältere, gut durchgeführte Studien [42], [43] sind nicht schlüssig in Bezug auf DNA-Schädigungen durch NIS zwischen 27 MHz und 3 GHz, obwohl in ihnen eine Exposition weit über den gesetzlichen Grenzwerten getestet wurde (SAR > 100 W/kg). In zwei Studien [20], [32] jedoch wurde über eine Zunahme der

Mutationsfähigkeit bei einer Exposition um 35 GHz berichtet. Referenzen und Details siehe Tabelle 16.

Verhalten

In 33 Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf das Verhalten von Arthropoden berichtet. In 28 Studien wurde über eine negative Wirkung und in keiner über positive Wirkungen berichtet. Fünf Studien sind nicht schlüssig. Bienen und Hornissen wurden in acht von 33 Studien untersucht, gefolgt von *Drosophila melanogaster*, die auch hier ein Modellorganismus ist.

Tabelle 7 Auswirkungen von NIS auf das Verhalten von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz	Gesamt allgemein
<i>Acromyrmex octospinosus</i>	1			1
<i>Aedes Aegypti</i>		1	1	2
<i>Apis mellifera</i>	3	3		6
<i>Apis mellifera carnica</i>	1			1
<i>Araneus diadematus</i>			1	1
<i>Caryedon gonagra</i>		1		1
<i>Pyrrhocoris apterus</i>		1		1
<i>Coptotermes formosanus</i>		1		1
<i>Dermacentor reticulatus</i>		1		1
<i>Drosophila melanogaster</i>	2	1		3
<i>Drosophila oregon</i>	1			1
<i>Drosophila sp., Calliphora sp.</i>	1			1
<i>Ixodes ricinus</i>		1		1
<i>Morimus funereus</i>	1			1
<i>Musca domestica</i>	1			1
<i>Myrmica sabuleti</i>		3		3
<i>Ophiogomphus colubrinus</i>	1			1
<i>Periplaneta americana</i>	1			1
<i>Schistocerca gregaria</i>	1			1
<i>Spodoptera litura</i>	1			1
<i>Tenebrio</i>	1			1
<i>Trichoplusia ni</i>	1			1
<i>Vespa orientalis</i>	2			2
Gesamt allgemein	19	13	2	34

Hauptsächlich werden eine Verringerung der Fortbewegungsgeschwindigkeit und ein Orientierungsverlust beobachtet. Dies geht wahrscheinlich auf eine Störung des inneren Kompasses der Arthropoden durch NIS zurück. In einigen Studien flüchteten die Individuen aufgrund der durch NIS induzierten Hitze aus dem exponiertem Gebiet [45], [46]. Umgekehrt

wird jedoch berichtet, dass sich Zecken durch Gebiete mit NIS-Exposition angezogen fühlen, so auch in zwei Studien von niedriger Verlässlichkeit [47], [48]. Manchmal wird die Verhaltensänderung mit Stressbiomarkern in Verbindung gebracht [49].

Die Verlässlichkeit in der Nachweise einer negativen Wirkung von NIS auf das Verhalten, vor allem Orientierung und Geschwindigkeit, ist insgesamt mittel, ausser im Bereich oberhalb von 6 GHz, für den es an qualitativ hochwertigen Studien mangelt. Für diesen Bereich wurden nur drei Studien gefunden, davon zwei ohne angemessen definierte Exposition [31], [50] und eine mit einer Exposition über den gesetzlichen Grenzwerten (bis zu 10 mW/cm²) [51]. Verhaltensänderungen können sich nachteilig auf die Nahrungssuche und damit auf die Aufrechterhaltung der Population auswirken. In einer Studie z.B. wurde berichtet, dass der Tanzrhythmus von Bienen durch die NIS-Exposition [23] verändert wurde, ohne jedoch die Expositionswerte anzugeben. Da Bienen den Schwänzeltanz nutzen, um untereinander eine Nahrungsquelle zu kommunizieren, kann dies in der Nachfolge weitere bedeutende Konsequenzen haben, Referenzen und Details siehe Tabelle 17.

Zirkadianer Rhythmus

In nur zwei Studien [52], [53] wird über eine Wirkung von NIS auf den zirkadianen Rhythmus berichtet. Die Wirkung ist in beiden Fällen negativ, aber die Exposition wurde in diesen Studien nicht klar definiert und überschreitet offenbar in Bartos 2019 [52] die regulatorischen Grenzwerte. Die Exposition wird in Bartos ohne weitere Angaben einfach als «Breitband-RF» und in Fedele (2014) [53] als SMF ohne Angabe der Exposition bezeichnet, die Verlässlichkeit daher gering. Fedele (2014) hat die Wirkung eines SMF auf die Geotaxis von *Drosophila* indirekt durch Messung der Expression des Cryptochroms untersucht. Er weist darauf hin, dass Cryptochrom ein wesentlicher Bestandteil der inneren Uhr ist und behauptet, dass seine Studie eine Wirkung eines SMF auf die innere Uhr nahelegt. Die oben genannten Studien beziehen sich jeweils auf *Blatella germanica* und eine unbestimmte *Drosophila*-Art.

Flugverhalten

In nur fünf Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf die Flugfähigkeit von Arthropoden berichtet, und bei keiner dieser Studien betrug die Expositionsfrequenz über 100 kHz. In einer Studie [54] wurde berichtet, dass *Schistocerca gregaria* dazu neigt, die Geschwindigkeit seiner Flügel mit der ausgestrahlten NIS von etwa 50 Hz zu synchronisieren. Unter den fünf Studien wies nur eine, von mittlerer Verlässlichkeit, eine Exposition unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte [55] auf, wobei im Grunde die Abwesenheit eines geomagnetischen Feldes untersucht wurde. Bei einer höheren Frequenz gibt es aufgrund fehlender Veröffentlichungen keine Belege für irgendeine Wirkung von NIS auf die Flugverhalten von Arthropoden.

Referenzen und Details siehe Tabelle 18. Insgesamt haben diese Arbeiten über den Frequenzbereich von 0 - 100 kHz mittlere Verlässlichkeit.

Tabelle 8 Auswirkungen von NIS auf das Flugverhalten von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	1	1
<i>Drosophila melanogaster</i>	1	1
<i>insects</i>	1	1
<i>Nephotettix virescens</i>	1	1
<i>Schistocerca gregaria</i>	1	1
Gesamt allgemein	5	5

Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten

In sechs Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf die Nahrungsaufnahme bei Arthropoden berichtet. In allen Fällen handelt es sich um negative Auswirkungen.

Tabelle 9 Auswirkungen von NIS auf Nahrungssuche und Anlegen von Vorräten bei Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	2	2	4
<i>Pheidole sp.</i>	1		1
<i>Neoponera inversa</i>	1		1
<i>Ectatomma brunneum</i>	1		1
<i>Myrmica sabuleti</i>		1	1
Gesamt allgemein	5	3	8

Eine der Studien zeigte, dass die Fähigkeit der Ameisen zur Nahrungssuche durch ein statisches Magnetfeld (60 μ T) beeinträchtigt wird [56]. Die Autoren weisen darauf hin, dass sie nicht ausschliessen können, dass die Ameisen durch die Versuchsanordnung selbst und nicht durch das erzeugte Magnetfeld gestresst wurden. Diese Hypothese wurde in ihrer Studie nicht korrekt getestet. In der zweiten Studie [57] wurde berichtet, dass Ameisen, die einem Feld von 925 MHz bis 960 MHz ausgesetzt waren, nicht in der Lage waren, zur Nahrungsquelle zurückzukehren. Im dritten Artikel [58] wird berichtet, dass die Exposition mit einem 2,4 GHz WLAN- Router die Stimulation durch Nahrung bei *Apis mellifera* hemmt, doch weist dieser Artikel Schwachstellen bei der Exposition und im Versuchsaufbau auf, sowie eine mittlere Verlässlichkeit. In einer vierten Studie [59] wird über das Ausbleiben der Honigproduktion unter NIS Exposition berichtet, doch diese Studie leidet unter erheblichen

methodischen Mängeln (die Autoren platzierten zwei Mobiltelefone in einem Bienenstock, nahmen aber keine Messung der Exposition vor). Die fünfte Studie [60] zeigte, dass eine Nahrungsquelle mit zunehmender Exposition von immer weniger Bienen erreicht wird. Die letzte Studie zeigte eine Beeinträchtigung der Mobilität in Verbindung mit der Nahrungsaufnahme bei Bienen [61]. Die Verlässlichkeit für Wirkungen von NIS auf die Nahrungsbeschaffung oder das Anlegen von Vorräten ist mittel und erfordert weitere Studien.

Orientierung

In 11 Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf die Orientierung von Arthropoden berichtet. In keiner von ihnen betrug die Exposition über 6 GHz. In 10 Studien wird über eine negative Wirkung berichtet. Eine weitere ist zu dieser Frage nicht aussagekräftig [62].

Tabelle 10 Auswirkungen von NIS auf die Orientierung von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	3	1	4
<i>Drosophila melanogaster</i>	1		1
<i>Gondogeneia antarctica</i>		1	1
<i>Myrmica sabuleti</i>		2	2
<i>Nilaparvata lugens</i>	1		1
<i>Paraphrynus laevifrons</i>		1	1
<i>Pieridae</i>	1		1
<i>Solenopsis sp.</i>	1		1
Gesamt allgemein	7	5	12

Die Auswirkungen von NIS auf die Orientierung wurden teilweise im breiten gefassten Abschnitt «Verhalten» erörtert. Dieser Abschnitt hier behandelt die *Orientierungsfähigkeit* der Arthropoden. Für den Bereich von 0 bis 100 kHz wurde in sechs Studien untersucht, wie sich eine Störung oder das Fehlen des geomagnetischen Feldes auf die Orientierung auswirkt [63]-[68], wobei der Schwerpunkt auf der Magnetorezeption der Arthropoden lag. Konkret bedeutet dies, dass NIS die Magnetorezeption bei Arthropoden und damit ihre Orientierungsfähigkeit beeinträchtigt, was sich wiederum auf die Nahrungssuche auswirken kann, wie im entsprechenden Abschnitt dargelegt. Die Verlässlichkeit einer Wirkung von NIS bis zu einer Frequenz von 6 GHz ist hoch. Vor allem wurde in sieben von neun Studien eine Exposition unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte getestet, und zwei lieferten keine ausreichenden Informationen über die Exposition. So wurde in einer Studie von mittlerer Verlässlichkeit berichtet, dass eine Exposition von 925 MHz bis zu 1,5 V/m wohl dazu führte, dass Ameisen nicht mehr in der Lage waren, in ihr Nest zurückzukehren [69]. Zum Vergleich: Die regulären

Intensitätsgrenzwerte für diese Frequenz liegen bei 42 V/m. Referenzen und Details siehe Tabelle 19.

Wirkung auf die Körperfunktionen und Stoffwechsel im Allgemeinen

In zehn Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf den Stoffwechsel von Arthropoden berichtet, abgesehen von oxidativem Stress und Stress-Biomarkern, die gesondert behandelt wurden. In sieben Studien wurde über eine negative Wirkung und in zwei über eine positive Wirkung berichtet. Eine weitere ist nicht schlüssig. Neun Studien behandeln den Frequenzbereich von 0 - 100 kHz und eine Studie den Bereich von 100 kHz - 6 GHz. Keine Studie behandelt den Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz.

Tabelle 11 Auswirkungen von NIS auf Körperfunktionen und Stoffwechsel im Allgemeinen von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Bezeichnung	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	1		1
<i>Drosophila melanogaster</i>		1	1
<i>Drosophila mel oregon</i>	1		1
<i>Isopoda Porcellio laevis</i>	1		1
<i>Lymantria dispar</i>	2		2
<i>Morimus funereus</i>	1		1
<i>Paravespula vulgaris</i>	1		1
<i>Periplaneta americana</i>	1		1
<i>Sitobion avenae</i>	1		1
Gesamt allgemein	9	1	10

Die Wirkungen sind vielfältig und reichen von einer Verringerung der Stoffwechselrate [70] bis hin zu einer Verringerung der Wirksamkeit von Skorpiongift bei Schaben (*P. americana*), die 50 Hz ausgesetzt waren [71]. In der Studie von Luo (2018) [70] wird jedoch über eine Exposition von 4-kV/cm mit einem elektrostatischen Feld berichtet. Diese Werte liegen weit über dem gewöhnlichen Umweltvorkommen. Tatsächlich berichteten drei Studien über Wirkungen (Verringerung der Stoffwechselrate [70], Verringerung des O₂-Verbrauchs [72] und Verringerung der Trehalase in der Lymphe [73]) nach Exposition gegenüber einem statischen Magnetfeld. Obwohl statische Magnetfelder eigentlich keine Strahlung abgeben, so bilden sie zum Teil jedoch die magnetische, wenn auch nicht oszillierende Komponente elektromagnetischer Felder, weshalb wir sie in die Übersicht aufgenommen haben. Obwohl in mehreren Studien mittlerer Verlässlichkeit über Wirkungen auf den Stoffwechsel berichtet wird, sind die genauen Auswirkungen und die jeweiligen Expositionsbedingungen nicht immer klar definiert. Referenzen und Details siehe Tabelle 20.

Thermische Wirkung

Die thermische Wirkung von NIS auf Insekten wurde in der landwirtschaftlichen Forschung als Mittel zur Desinfektion von Lebensmittelbeständen, vor allem Getreide und Obst, untersucht. Die in diesen Kontexten genutzten Expositionen entsprechen dem Erhitzen von Lebensmitteln in einem Mikrowellenofen bei 27 MHz und einer Leistung von 1 kW und zielen auf selektives Erhitzen ab, um Insekten zu töten (siehe z. B. [74]) oder zu vertreiben [45], ohne die gelagerten Lebensmittel zu garen. Für eine Übersicht zu diesem Thema siehe Yadav (2014) [75]. Wir haben beschlossen, diese Studien nicht in den Korpus dieses systematischen Reviews aufzunehmen, wie im Abschnitt **Methoden** erläutert.

Zwei Studien haben eine thermische Wirkung an Arthropoden gezeigt [76], [77]. Sie arbeiten jedoch mit einer Exposition über den gesetzlichen Grenzwerten, wobei die Expositionsparameter jeweils 135-314 V/m für Frequenzen zwischen 915 MHz und 2450 MHz betragen und der SAR-Wert bei 13-208 W/kg für die Frequenz von 5,95 GHz liegt.

Diese thermische Wirkung wird im Zusammenhang mit der Schädlingsbekämpfung umfassend erforscht. Die thermische Wirkung ist eine Folge der dielektrischen Erwärmung, die durch die Ionenbewegung und der Dipolrotation, die Drehung der polaren Moleküle. Beide Effekte werden durch RF ausgelöst [78]. Diese dielektrische Erwärmung hängt von den physikalischen Eigenschaften der exponierten Elemente ab. Hier sind dies die Arthropoden und die gelagerten Lebensmittel [79] – [81]. Die Erwärmung ist direkt an die SAR gekoppelt, deren Intensität sich proportional zur Leitfähigkeit und Dichte des exponierten Gewebes verhält [82], [83]. Ausgehend von den unterschiedlichen Eigenschaften der gelagerten Lebensmittel und der Arthropoden versuchen die Forscher, die selektive Aufheizung der Arthropoden zu optimieren, d. h. durch Verwendung von RF mit einer bestimmten Frequenz und Intensität, die Arthropoden, nicht aber die gelagerten Lebensmittel zu erhitzen. Daher wurde in einigen Studien versucht, die dielektrischen Eigenschaften von Arthropoden zu modellieren [15], [84] – [86].

Eine Modellierungsstudie deutet darauf hin, dass ein geringer Anstieg der einfallenden Leistungsdichte um 10 % bei Frequenzen von unter 3 GHz und höheren Frequenzen zu einem relativen Anstieg der Leistungsaufnahme um einen Faktor von mehr als drei führt [84], doch die Ergebnisse sind noch vorläufig. Dies bedeutet, dass für die Nutzung zukünftiger 5G-Frequenzen (> 6 GHz) die Schwellenwerte für die thermische Wirkung auf Arthropoden geprüft werden müssten, die niedriger sein könnten als die für Menschen und Säugetiere festgelegten Schwellenwerte. In einer weiteren durch Experimente unterstützten Modellierungsstudie wurde ermittelt, dass 6 Sekunden Exposition gegenüber 10,2 GHz bei

einer PFD von 0,37-0,38 mW/cm² ausreichend waren, um Insekten im Larvenstadium zu töten und die Schlupfrate der Puppen zu verringern [87].

In vielen der in dieser Übersicht ausgewählten Studien wird die Temperatur nicht kontrolliert oder gemessen, und es ist oft nicht bekannt, ob die beobachteten Wirkungen hochfrequenter NIS auf Verhalten, Körperfunktionen, Zellstress usw. auf die dielektrische Erwärmung zurückzuführen sind oder nicht. Daher sollte in Studien, die vorgeben, die nicht-thermischen Auswirkungen von NIS-HF zu untersuchen, der Temperaturanstieg als Störfaktor vorsichtshalber kontrolliert und analysiert werden. Bei Studien, in denen ein Mobiltelefon sehr nahe an Arthropoden platziert wird, ist zu berücksichtigen, dass ein aktives Mobiltelefon nicht nur eine Quelle von NIS-HF ist, sondern aufgrund des Akkus auch ein warmer Körper, und dass unter Kontrollbedingungen das mobile Gerät oder der Dummy die gleiche Temperatur haben muss.

In einer Studie z.B. wurde die Reaktion auf NIS durch eine Kontrolle des Temperaturanstiegs in der Kontrollgruppe untersucht [49]. Diese Studie zeigte, dass Expositionen gegenüber niedrigen Frequenzen (50 Hz, 7 mT, über den gesetzlichen Grenzwerten in der Schweiz) bei Grillen eine erhöhte Synthese von Heat Shock Proteins (Hsp) – eine physiologische Reaktion auf Hitzestress – bewirkten. In dieser Versuchsanordnung wurde die Temperaturwirkung in der Kontrollgruppe so angepasst, dass er mit dem Temperaturanstieg in der Gruppe mit Exposition übereinstimmte, und die NIS-Frequenz (50 Hz) wurde als deutlich niedriger angesehen als der Wert, von dem angenommen wird, dass er eine thermische Wirkung hat (100 kHz). Dies deutet auf eine mögliche thermische Wirkung auf Zellebene hin, die ausreicht, um Stoffwechselreaktionen auszulösen, bleibt aber sehr hypothetisch. Das in dieser Studie verwendete Versuchsprotokoll erlaubt jedoch keine zu 100 % sichere Aussage darüber, dass das exprimierte Hsp70 auf Hitzestress zurückgeht, da dieses Protein auch bei anderen physiologischen Reaktionen eine Rolle spielt.

Fortbewegungsgeschwindigkeit

In 13 Studien wurde über eine Wirkung von NIS auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit von Arthropoden berichtet. Neun Studien berichten über negative Wirkungen, zwei über positive Wirkungen und zwei weitere sind nicht eindeutig. In zehn Studien wurde eine Wirkung im Frequenzbereich von 0-100 kHz, in Dreien zwischen 100 kHz bis 6 GHz festgestellt. In keiner Studie wurde eine Wirkung oberhalb von 6 GHz festgestellt.

Tabelle 12 Auswirkungen von NIS auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Organismus	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>	1		1
<i>Apis mellifera carnica</i>	1		1
<i>Blaptica dubia</i>	1		1
<i>Drosophila melanogaster</i>		1	1
<i>Drosophila subobscura</i>	2		2
<i>Morimus funereus</i>	2		2
<i>Myrmica sabuleti</i>		1	1
<i>Periplaneta americana</i>	2	1	3
<i>Schistocerca gregaria</i>	1		1
Gesamt allgemein	10	3	13

Insgesamt wurde in den Studien eine Abnahme der motorischen Aktivität bei NIR-Exposition festgestellt. Die Verlässlichkeit aller Nachweise für diese Wirkung ist bei einer Frequenz bis 6 GHz hoch und darüber gleich null. Vácha (2009) [88] gibt an, dass die verminderte Fortbewegung wahrscheinlich auf die durch NIS induzierte Störung der Magnetorezeption zurückzuführen ist. Referenzen und Details siehe Tabelle 21.

Zellstress

In 14 Studien wurde festgestellt, dass NIS Zellstress auslöst. Dieser Stress wird z.B. durch gezieltes Ansprechen der MAPK-Signalgebung [30], der Superoxiddismutase- oder Katalase-Aktivitäten [89] gemessen. Das Vertrauen in eine solche Wirkung bis zu 100 kHz hoch und bei 100 kHz bis 6 GHz gering. Für Frequenzen oberhalb von 6 GHz gibt es keine Nachweise. Die Wirkung ist bis 100 kHz sehr deutlich, da in fünf Studien von recht guter Qualität Wirkungen bei Expositionen unterhalb der aktuellen gesetzlichen Grenzwerte festgestellt wurden [89] – [92].

Tabelle 13 Auswirkungen von NIS auf Überleben und Sterblichkeit von Arthropoden. Anzahl der Studien, aufgeschlüsselt nach Art und Frequenzbereich.

Bezeichnung	0 Hz – 100 kHz	100 kHz – 6 GHz	Gesamt allgemein
<i>Apis mellifera</i>		2	2
<i>Baculum extradentatum</i>		1	1
bee		1	1
<i>Drosophila melanogaster</i>		3	3
<i>Drosophila sp.</i>		1	1
<i>Drosophila subobscura</i>		1	1
<i>Nilaparvata lugens</i>		1	1
<i>Periplaneta americana</i>		1	1
<i>Schistocerca gregaria</i>		1	1
Gesamt allgemein		12	14

Weitere Stress-Biomarker wurden bei Frequenzen bis zu 100 KHz festgestellt, wie Hsp70/Hsp26 [49], [90], aber es ist schwer zu beurteilen, welcher Teil dieser Reaktion auf Hitzestress und nicht auf NIS zurückzuführen ist. Beispielsweise wird laut Zhang et al. [90] eine synergistische Hsp- Reaktion offenbar durch einen Temperaturanstieg und eine Exposition gegenüber 50 Hz hervorgerufen. Dies entspricht auch den Beobachtungen von Michel (1999) [91]. Interessanterweise wird dasselbe synergistische Muster auf die Biomarker-Expression bei gleichzeitiger Exposition gegenüber Pestiziden und NIS beschrieben [92]. Referenzen und Details siehe Tabelle 22.

Population

In vier Artikeln wurden die Wirkungen von NIS auf Populationen von Bodenarthropoden untersucht. Einer berichtet über negative Wirkungen und drei sind nicht schlüssig. Hier wird der Begriff «Population» im ökologischen Sinne verstanden, d.h. als Gesamtheit der Individuen einer Art, die denselben Lebensraum am selben Ort bewohnen. In einer Studie wurden die langfristigen Auswirkungen (mehrere Jahre) von ELF auf Bodenarthropoden-Populationen [93] in einem realen Umweltkontext untersucht. Dabei konnten keine Auswirkungen festgestellt werden. Die zweite Studie konzentrierte sich auf die Wirkung von NIS in einem Frequenzbereich von 800 MHz bis 2600 MHz auf die Bienenpopulation, kam aber je nach Spezies zu unterschiedlichen Ergebnissen: Eine Zunahme der Population bei Honigbienen, sowie eine Abnahme bei Käfern, keine Veränderung wurde bei Wildbienen festgestellt [94]. Die beiden letzten Studien leiden unter methodischen Mängeln hinsichtlich der Expositionsbedingungen [59], [95]. Insgesamt gibt es eine geringe Verlässlichkeit für ausbleibende Wirkungen von NIS von 0 Hz bis 100 kHz auf die Populationen sowie für negative Auswirkungen von NIS von 100 kHz bis 6 Ghz.

Ökosystemebene

Wir haben keine Publikationen gefunden, in denen die Folgen der Wirkung von NIS auf Arthropoden für die Ökosysteme untersucht werden. Diese Folgen werden in der entsprechenden Sektion der Diskussion behandelt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt wurden zahlreiche Studien durchgeführt, um die Wirkung von NIS auf Arthropoden (76 von 0 Hz bis 100 kHz, 47 von 100 kHz bis 6 GHz) zu ermitteln. Es liegen aber nur wenige (neun) Studien für Frequenzen oberhalb von 6 GHz vor und aufgrund des Mangels an qualitativ hochwertigen Studien in diesem Frequenzbereich kaum Belege für irgendwelche Auswirkungen. Wenn dies getestet wird, nimmt das Ausmass der Wirkungen mit der Intensität der Exposition zu, z.B. bei Panagopoulos 2007 [96].

In Abbildung 4 werden die Informationen zusammengefasst. Die Verlässlichkeit spiegelt die Zuverlässigkeit der Beobachtung wieder, weitestgehend unabhängig davon, ob die Wirkung negativ, positiv oder gar nicht vorhanden ist. Ein hohes Mass an Verlässlichkeit in das Fehlen einer Wirkung bedeutet also, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass die Wirkung tatsächlich nicht eintritt. In der Praxis sind alle hier berichteten Wirkungen negativ, mit Ausnahme der Wirkung von NIS zwischen 0-100 kHz auf Populationen, oder das Vertrauen bezieht sich auf eine ausbleibende Wirkung. Die Kategorien der Verlässlichkeit haben folgende Bedeutung:

- Hoch: Hohe Verlässlichkeit in den Zusammenhang zwischen NIS-Exposition und Ergebnis. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die in den Studien beobachtete Wirkung die tatsächliche Wirkung widerspiegelt.
- Mittel: Mittlere Verlässlichkeit in den Zusammenhang zwischen NIS-Exposition und beobachtetem Ergebnis. Die beobachtete Wirkung spiegelt vielleicht die tatsächliche Wirkung wider.
- Gering: Geringe Verlässlichkeit in den Zusammenhang zwischen NIS-Exposition und Ergebnis. Die Studien lassen keinen Schluss darüber zu, ob die beobachtete Wirkung der tatsächlichen Wirkung entspricht oder nicht.

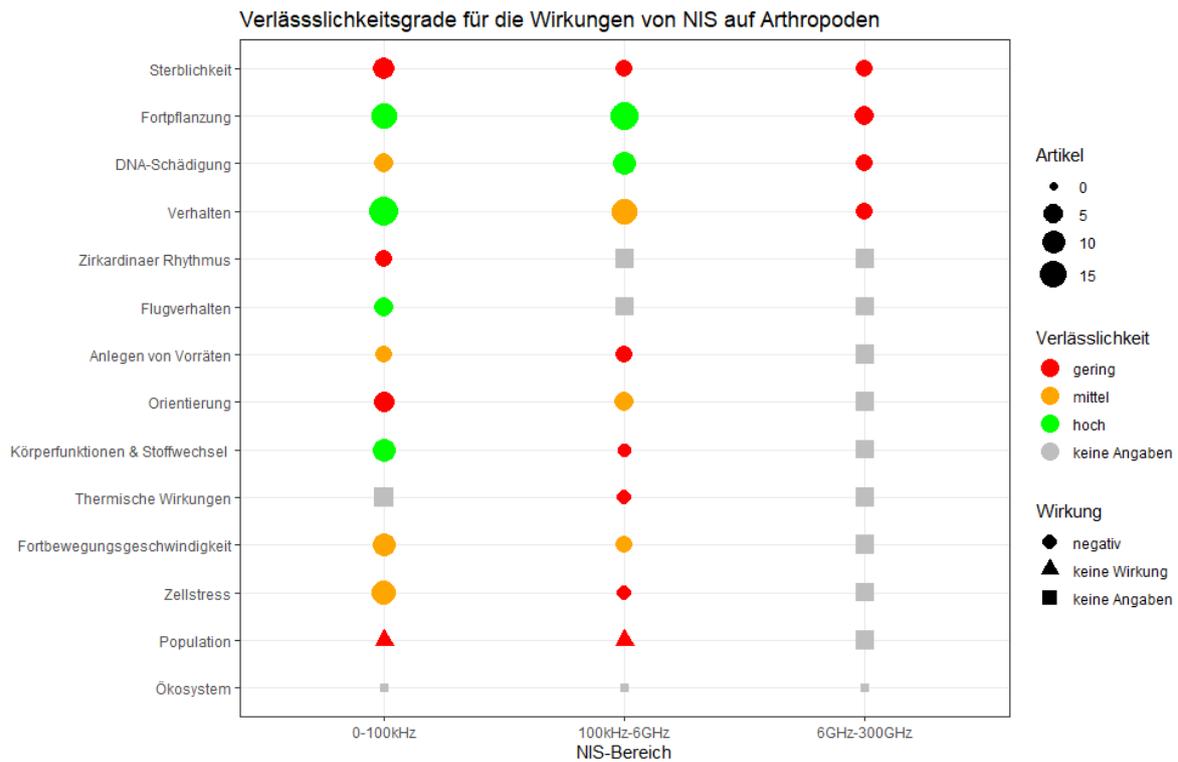


Abbildung 4 Verlässlichkeit in die Nachweise der NIS-Wirkungen in verschiedenen Frequenzbereichen. Alle berichteten Wirkungen sind negativ, mit Ausnahme der NIS-Wirkung auf die Population zwischen 0 und 100 KHz. Diese Wirkung ist mit einem Dreieck gekennzeichnet.

NIS-Wirkungen wurden mit einer akzeptablen Verlässlichkeit (mindestens mittel) für Fortbewegung, Fortpflanzung, Nahrungssuche, Orientierung, DNA-Schädigung, Zellstress, Verhalten und verschiedene Körperfunktionen für Frequenzen bis 6 GHz ermittelt. Von 0 bis 100 kHz gibt es eine hohe Verlässlichkeit für negative Wirkungen von NIS auf Fortpflanzung, Körperfunktionen, Verhalten und Flugfähigkeit. Von 100 kHz bis 6 GHz gibt es eine hohe Verlässlichkeit für negative Wirkungen von NIS auf die Fortpflanzung und in Form von DNA-Schädigungen. Für eine Wirkung von NIS auf Arthropoden oberhalb von 6 GHz liegen keinerlei Arbeiten mit hoher oder mittlerer Verlässlichkeit vor. Die niedrige Verlässlichkeit für eine bestimmte Wirkung und einen bestimmten Frequenzbereich wird auf den Mangel an verfügbaren Studien von guter Qualität zurückgeführt. Das heisst: Selbst, wenn es derzeit keinen Beweis für eine bestimmte Wirkung bei einer bestimmten Frequenz gibt, so ist dies kein Beweis dafür, dass es diese Wirkung nicht gibt. Oberhalb von 6 GHz gibt es nur wenige Studien und es ist nahezu unmöglich, Schlussfolgerungen über die Wirkungen von NIS in diesem Frequenzbereich zu ziehen.

Ein wichtiger Aspekt bei diesen hier vorgestellten Ergebnissen ist, dass alle Wirkungen, die mit einer angemessener Verlässlichkeit (mittel oder hoch) ermittelt wurden, mitunter auch bei Expositionswerten unterhalb der regulatorischen Schwellenwerte beobachtet wurden, obwohl

die in den verschiedenen Studien verwendeten Expositionen nicht unbedingt die tatsächlichen Expositionsbedingungen in der Umwelt widerspiegeln (siehe unten).

Diskussion

Vergleich mit bestehenden Schriften

Die neueste und umfassendste Übersicht über die Wirkungen von 5G und NIS im Allgemeinen auf lebende Organismen (nichtmenschliche Wirbeltiere, wirbellose Tiere und Pflanzen) wurde 2021 für den Forschungsdienst des Europäischen Parlaments veröffentlicht [9]. Diese Übersicht ist umfassend, doch fehlt eine Bewertung der Studienqualität. Sie berichtet zwar über eine thermische Wirkung von NIS auf Arthropoden, doch haben wir gesehen, dass diese Studien aufgrund der unterschiedlichen Grössenordnungen der experimentellen Expositionen in diesen Studien und den tatsächlichen Umweltexpositionen keine Schlüsse auf eine thermische Wirkung bei den aktuellen Umweltexpositionen zulassen. Die im Bericht des Europäischen Parlaments angeführte Wirkung der dielektrischen Erhitzung der RF auf Wirbellose bei Frequenzen von < 6 GHz wird gestützt durch Studien zur Schädlingsbekämpfung bei hohen Expositionsgraden, bei denen eine selektive Erhitzung angewendet wird (vgl. Erläuterungen im Abschnitt zur thermischen Wirkung). Für Frequenzen über 6 GHz lautet die Schlussfolgerung aus dieser Übersicht, dass die Beweise aufgrund fehlender Studien über die Höhe der Umweltexposition schwach sind.

Im Anschluss an das EKLIPSE-Projekt wurde eine Übersicht veröffentlicht, in der eine Bewertung der Studienqualität erfolgte [7]. Diese Studie konzentriert sich auf Bestäuber. Trotz der Unklarheiten beim Prozess der Qualitätsbewertung sind die Beweise für die Wirkungen von NIS auf Bestäuber aufgrund eines Mangels an verfügbaren Studien schwach. Die allgemeine Schlussfolgerung der Übersicht aus dem EKLIPSE-Projekts lautet, dass es keine gut belegten Wirkungen irgendeines Frequenzbereichs auf Bestäuber gibt. Da unser aktueller Bericht alle Arthropoden umfasst, ist unser Artikelkorpus etwas umfassender und die Qualität der Belege aufgrund des grösseren Korpus etwas besser.

Unsere Übersicht zeigt klar, dass Evidenz für die Wirkung von NIS auf Arthropoden bis zu 6 GHz bei gutem Verlässlichkeitsgrad auf Fortpflanzung, Fortbewegung, Verhalten, Nahrungssuche und DNA-Schädigung vorliegt. Wichtig: Die meisten dieser Wirkungen wurden bei Intensitäten gemessen und beobachtet, die unterhalb der von der ICNIRP festgelegten regulatorischen Schwellenwerte liegen. Auch wenn die Qualität einzelner Studien oft nicht ausreicht, um solide Schlussfolgerungen zu einer bestimmten Wirkung zu ziehen,

führt das Vorliegen übereinstimmender Ergebnisse aus verschiedenen Studien von unterschiedlichen Forschungsgruppen mit unterschiedlichen Protokollen zu einer hohen Wahrscheinlichkeit, dass solche Wirkungen auch unter realen Bedingungen eintreten. Dies sollte ein Anreiz sein, weitere Studien durchzuführen, um die Wirkungen von NIS eindeutig zu klären. Insbesondere ist es wichtig, experimentelle Designs zu schaffen, in denen Störfaktoren fein abgestuft kontrolliert werden, um die Wirkungen von NIS auf das untersuchte Bewertungskriterium genau messen zu können.

Welches sind die Wirkmechanismen von NIS bei Auswirkungen auf das Verhaltens ?

Die Mechanismen der Wirkung von NIS bei Verhaltensstörungen sind unklar, und die verschiedenen Studien bieten selten physiologische Erklärungen an. Die beobachteten Auswirkungen auf das Verhalten betrafen den zirkadianen Rhythmus, die Orientierung, die Fortbewegungsgeschwindigkeit, die Flugfähigkeit, die Nahrungssuche und das Anlegen von Vorräten. Die Wirkung von NIS auf die Orientierung ist sehr wahrscheinlich auf eine Störung des Magnetsinns zurückzuführen, der an der Orientierung beteiligt ist.

Ein weiterer biologisch relevanter Faktor oder Parameter könnte eine Störung der spannungsgesteuerten Calciumkanäle (VGCC) oder anderer Ionenkanäle sein. Diese Kanäle sind an sehr vielen physiologischen Prozessen beteiligt [97], vor allem auf neuronaler Ebene. Die Wirkung von NIS auf diese Kanäle ist bei Arthropoden nur unzureichend untersucht, jedoch gibt es einige Studien bei Wirbeltieren, und die Struktur der Calciumkanäle weist innerhalb dieser taxonomischen Gruppen zum Teil hohe Ähnlichkeit auf [98].

Es gibt einige Arbeiten, darunter drei systematische Übersichtsarbeiten über *in-vitro*- und *in-vivo*-Studien, in denen die Wirkung niedriger Frequenzen auf die Calciumkanäle untersucht wird [99] – [101]. Diese systematischen Übersichtsarbeiten unterscheiden sich in ihren Schlussfolgerungen. Wood und Karipidis (2020) [100] argumentieren, dass eine Depolarisierung von Calciumkanälen Intensitäten erfordert, die um mehrere Größenordnungen über den vorgeschriebenen Grenzwerten liegen, zeigen aber, dass eine chronische Exposition bei niedrigeren Intensitäten mit einer Zunahme der Calciumkanäle einhergeht. Auch wenn die Literatur zu diesem Thema in Bezug auf Arthropoden spärlich ist, wird die Hypothese der Calciumkanäle in den für diesen Bericht ausgewählten Studien gelegentlich erwähnt. Zum Beispiel stellt Jankowska (2015) die Hypothese auf, dass die verringerte Wirksamkeit von Skorpiongift auf das Nervensystem von Arthropoden, die niederfrequenter NIS ausgesetzt sind, auf eine Störung der Calciumhomöostase zurückzuführen ist, die die calciumgesteuerten Kaliumkanäle beeinträchtigt [71], [102], [103].

Die jüngsten Fortschritte in diesem Bereich wurden von Bertagna et al. (2022) erzielt, die einen NIS-sensiblen Ca^{2+} -Transporter in einer an der Calciumhomöostase beteiligten in-vitro-Zellkultur HEK 293 identifizieren konnten [99]. Die NIS-Wirkungen auf die Calciumhomöostase werden auch zu therapeutischen Zwecken genutzt [104]. Wir sind daher der Ansicht, dass die Hypothese der NIS-Effekte auf Calciumkanäle (und womöglich auch andere Ionenkanäle) sowie die Calcium-Homöostase einen stichhaltigen Beitrag leisten kann, um die physiologischen Reaktionen besser zu verstehen, die durch die NIS-Exposition hervorgerufen werden, und zwar nicht nur bei Wirbeltieren, sondern auch bei Arthropoden.

Schwierigkeit, ein solides experimentelles Design zu schaffen, das eine reale Umweltexposition simuliert

Der niedrige Evidenzgrad, der mit der Wirkung von NIS in den verschiedenen Kategorien einhergeht, ist vor allem auf einen schlechten Versuchsaufbau, widersprüchliche Ergebnisse oder fehlende Studien zurückzuführen. In einem Buchkapitel erklären Panagopoulos und Margaritis, dass die Unstimmigkeiten und Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Laborexperimenten wahrscheinlich auf die elektromagnetische Verschmutzung innerhalb der einzelnen Labore aufgrund von elektrischen Geräten und Leitungen zurückzuführen sind [105]. Sie weisen darauf hin, wie wichtig eine solide Methodik ist. Einige Studien schützen ihre Versuchsanordnung mit einem Faraday'schen Käfig, aber manchmal ist dieser Käfig auf einer Seite offen (z.B. [29]). Zudem werden Störfaktoren nur selten berücksichtigt und oft kann nicht ausgeschlossen werden, dass die beobachteten Wirkungen durch Temperatur, Handhabung etc. verursacht werden. Die Temperatur zum Beispiel wird nicht immer gemessen. Wenn sie gemessen wird, wird ihre Wirkung nur in wenigen Studien bewertet. Vanbergen [7] kam zu demselben Schluss, als er schrieb: «Die allgemeine wissenschaftliche Qualität der Studien muss unbedingt verbessert werden, wenn wir ein realistisches Bild des Risikograds [106] erhalten wollen. Zukünftige Studien müssen auf Annahmen beruhen, auf einem soliden theoretischen Rahmen, mit dem sich die Ergebnisse der Experimente oder Studien nachprüfbar vorhersagen lassen. Ein gutes Studiendesign ist natürlich ebenfalls entscheidend, wird aber in vielen Fällen offenbar vernachlässigt.» [7]

Die meisten Studien werden im Labor durchgeführt und die getesteten Expositionsbedingungen weichen oft von den Umweltbedingungen ab. Im Labor ist die Exposition konstant, von fester Dauer und von eher hoher Intensität. In einer realistischen Konfiguration jedoch ist die Exposition aufgrund der wechselnden Eigenschaften der menschengemachten NIS-Emissionen [107], [108] und des Verhaltens der Arthropoden variabel in Intensität und Dauer. Flugarthropoden werden während eines Fluges auf unterschiedliche Expositionsgrade

stossen und starke NIS-Quellen möglicherweise meiden (z.B. [109]). Bei Bodenarthropoden ist die Situation noch komplexer, da die schützende Wirkung des Bodens unklar ist. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass der Boden je nach Struktur und Wassergehalt elektromagnetische Signale abmildert [110] – [112].

Schliesslich ist zu beachten, dass die untersuchten Arten eine erhebliche Stichprobenverzerrung aufweisen: Die Modellarten in den Laboratorien wurden im Laufe der Zeit aufgrund ihrer einfachen Aufzucht und relativen Robustheit ausgewählt. Es ist daher möglich, dass die Wirkungen von NIS bei anfälligen Arthropoden stärker ausgeprägt sind, die naturgemäss nicht im Labor untersucht werden, da sie nur zu schwer zu züchten sind.

Zuverlässigkeit der Bewertung der Wirkung von NIS und der damit verbundenen Gefahren

Aufgrund der Unterschiede zwischen der Exposition im Labor und der Exposition im Feld ist es, selbst wenn einige Wirkungen in dieser Übersichtsarbeit mit einem korrekten Verlässlichkeitgrad (d. h. mindestens mittel) bewertet werden, schwierig, Schlussfolgerungen über das Auftreten und den Schweregrad dieser Wirkungen in der natürlichen Umgebung zu ziehen. Die Folgen einer möglichen zukünftigen Nutzung neuer Frequenzbereiche für die Mobiltelefonie, vor allem im Millimeterwellenbereich, sind noch schwieriger abzuschätzen: Je nach Netzdichte können die Expositionswerte möglicherweise niedriger sein als derzeit, auch wenn die Literatur hierzu noch spärlich ist [113] – [115]. Zudem werden NIS bei ihrer Ausstrahlung gebeugt, wobei sich die Intensität nach der Wellenlänge richtet [116]. Aufgrund dieses Mechanismus gilt: Je geringer die Wellenlänge, desto weniger weit breiten sich die Wellen aus. So sind die potenziellen Auswirkungen von Millimeterwellen eher in der Umgebung von Sendern zu erwarten, mit möglicherweise geringen Auswirkungen auf die weiter entfernte Tierwelt.

Klar ist, dass es Wirkungen auf verschiedenen Ebenen gibt, die bei Arthropoden sowohl auf der Ebene des Organismus als auch auf Zellebene beobachtet werden können und messbar sind. Diese Wirkungen sollten Folgen für die Arthropodenpopulationen haben, aber die wenigen Studien *in situ* haben keine Wirkung der NIS auf die Populationen gezeigt. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass der fehlende Nachweis einer Wirkung nicht gleichbedeutend mit dem Nachweis einer fehlenden Wirkung ist und dass weitere Feldstudien durchgeführt werden sollten.

Ein wichtiger Aspekt ist jedoch, dass die Zellstressmarker vermehrt vorhanden sind, wenn die NIS-Exposition mit einem anderen Stressfaktor zusammenfällt. Thermischer Stress wird so

durch niederfrequente NIS verstärkt [117]. Dies ist ein Element, das wir in den IPCC-Szenarien [118] berücksichtigen sollten, in denen die fortschreitende globale Erwärmung allmählich eine weitere Ursache für thermischen Stress darstellt [119], [120].

Risiko für die Arthropoden-Populationen

Anthropogene NIS stellen eine potenzielle Bedrohung für Arthropodenpopulationen dar, da sie den Selektionswert (Fitness), die Fortpflanzung und das Verhalten von Individuen beeinträchtigen. Auch wenn es sehr unwahrscheinlich ist, dass NIS auf regionaler Ebene zum Aussterben einer Art führt, könnte NIS den Artenreichtum und damit die Grösse der Populationen beeinflussen und sie anfälliger für das Aussterben machen. Dies gilt umso mehr, da Wechselwirkungen oder synergetische Effekte mit anderen Faktoren wie Pestiziden und Habitattrennung möglich sind [117] und zum lokalen Aussterben bereits bedrohter Populationen beitragen können.

Die 4 Studien an der Population lassen derzeit keinen Schluss darüber zu, dass NIS auf die Populationen wirkt. Zwei Szenarien sind denkbar: 1) Die derzeitigen Umweltexpositionen rufen keine Wirkungen hervor, die gross genug wären, um die Populationen zu beeinträchtigen. 2) Die wenigen vorhandenen Studien verfügen über kein geeignetes Design (Exposition usw.), um die Wirkungen auf die Populationen sicher zu ermitteln. Wahrscheinlich haben wir es mit einer Kombination aus beiden Szenarien zu tun, mit geringen tatsächlichen Wirkungen auf die Population einerseits und Studien, in denen diese Wirkungen nicht nachgewiesen werden können, andererseits. Daher ist es wichtig, qualitativ hochwertige Studien zu planen und durchzuführen, um die Wirkungen von NIS auf Arthropodenpopulationen genau zu untersuchen.

Unter der Annahme, dass die Umweltexposition gegenüber NIS eine gewisse schädliche Wirkung in Form einer Verringerung der Populationsgrösse auf bestimmte Arthropodenarten hat, steigt jedoch das Risiko eines lokalen Aussterbens und NIS könnten daher in Kombination mit anderen Faktoren wie der Intensivierung der Landwirtschaft (Stickstoffeinträge, Pestizide), der Habitattrennung und dem Klimawandel zum aktuellen Rückgang der Artenzahl und der Biomasse der Insekten beitragen (vgl. zum Beispiel [121]–[130]). Bislang konnten diese Wirkungen jedoch nicht nachgewiesen werden.

Innerhalb der Populationen sind nicht unbedingt alle Individuen gleichermassen betroffen. Es wurde nachgewiesen, dass NIS Individuen je nach Entwicklungsstadium, ökologischer Sensibilität (bezogen auf Habitatpräferenzen) und Geschlecht im Labor beeinträchtigen können (vgl. **Ergebnisteil**). Daher sind Veränderungen in der Struktur der Populationen (Demografie, Geschlechterverhältnis) und Gemeinschaften zu erwarten, wenn solche

Wirkungen unter Umweltbedingungen weiter anhalten. Dieses Risiko ist unklar, da es an Nachweisen und Kenntnissen über die Wirkung von NIS auf Arthropoden mangelt, vor allem hinsichtlich Dosis/Exposition und Wirkungsmechanismen.

Risiko für die Ökosysteme

NIS-bedingte Veränderungen auf der Ebene von Individuen und Populationen führen wahrscheinlich zu Veränderungen der Struktur von Gemeinschaften, der Interaktionen zwischen den Arten und der trophischen Netze. Diese Veränderungen können wiederum die Funktionsweise von Ökosystemen verändern. Beispielsweise wurde über nicht-zufällige Wirkungen von anthropogenen NIS auf Bestäuber berichtet (was mit unseren Ergebnissen übereinstimmt), mit wahrscheinlichen Auswirkungen auf Artenreichtum und Diversität, aber auch auf die Bestäubung als wichtigen Prozess im Ökosystem [7], einschliesslich bei niedrigen Frequenzen. Ferner wurde nachgewiesen, dass der Rückgang der Insekten eine bedeutende Rolle beim Rückgang der insektenfressenden Vögel spielt [131], [132]. Auch hier reichen die Beweise und das begrenzte Wissen über die Wirkungen von NIS auf die Populationen nicht aus, um die Bedrohung der Ökosysteme durch NIS zu bewerten.

Schlüsselemente

- Insgesamt liegen bislang noch keine formalen und präzisen Antworten auf die in dieser Übersicht angesprochenen Fragen vor. Es gibt einen gewissen Evidenzgrad für spezifische Wirkungen, was für die Notwendigkeit spricht, die möglichen Wirkungen von NIS auf Insekten und Arthropoden weiter zu untersuchen. Insbesondere gibt es einen Mangel an Literatur für den Bereich oberhalb von 6 GHz. Darüber hinaus müssen die Folgen der potenziellen Wirkungen von NIS auf die Biodiversität und das Ökosystem in ihrer Gesamtheit weiter untersucht werden, um die Gesamtrelevanz der auf verschiedenen Ebenen, d.h. auf der Ebene der Zellen, der Individuen und der Populationen, in verschiedenen Umgebungen und Regionen beobachteten Wirkungen zu bewerten.
- Es muss ein solider experimenteller Rahmen mit zuverlässigen Expositionsbedingungen entwickelt werden. Zweitens sind unter allen Umständen Störfaktoren zu berücksichtigen, um vor allem zwischen thermischen und nicht-thermischen Wirkungen unterscheiden zu können. Wichtig ist es auch, Studien durchzuführen, um die Wirkungen von Millimeterwellen auf Arthropoden zu bewerten. Einige experimentelle Studien mit strenger Versuchsanordnung würden die Zweifel über die Art und das Ausmass dieser Wirkungen relativ schnell ausräumen.

- Die Auswirkungen auf Sterblichkeit, Fortbewegungsgeschwindigkeit, Fortpflanzung, Orientierung, Nahrungssuche, Flugfähigkeit, DNA-Schädigung, innere Uhr, Zellstress, Körper-funktionen und Verhalten wurden (mit variablem Verlässlichkeitsniveau) bis zu 6 GHz dokumentiert. Unter welchen Expositionsbedingungen solche Wirkungen eintreten, ist unklar. Es wurden jedoch Wirkungen unterhalb der gesetzlichen Immissions-Grenzwerte, wie sie in der NISV definiert wurden, beobachtet. Die Wirkungen in grösserem Massstab (Population, Ökosystem) sind unbekannt. Die meisten Studien wurden an Zweiflüglern durchgeführt, die nicht die Gesamtheit der Arthropoden repräsentieren. Daher müssen auch andere Arten untersucht werden, die potenziell anfälliger sind oder deren Verschwinden erhebliche Störungen des Ökosystems zur Folge hätte (keystone species) [133]. Neben der Häufigkeit und Intensität von NIS sollten die Wirkungen auch in Bezug auf die Spezies untersucht werden.
- Sollten sich die Wirkungen von NIS als gross und weit verbreitet erweisen, müssten wir mit einem Verlust an Biodiversität und einer Störung der Ökosysteme rechnen. Allerdings hindern uns der oft niedrige Evidenzgrad und das dürftige Wissen über die Wirkung von NIS daran, weitere Schlussfolgerungen zu ziehen. NIS wirken eindeutig subletal auf Arthropoden, sowohl auf der Ebene der Zellen als auch des Organismus. Es ist jedoch schwierig, diese Wirkungen als Bedrohungen der Biodiversität oder der Ökosysteme zu werten, da Arthropoden möglicherweise über Mechanismen zur Verhaltens-anpassung verfügen, um den Wirkungen der NIS-Expositionen unter realen Bedingungen entgegenzuwirken.
- Es ist nicht bekannt, ob die Nutzung von Millimeterwellen eine zusätzliche Bedrohung für Arthropoden darstellt, da zu wenige Studien für diesen Frequenzbereich (> 6 GHz) vorliegen. Dennoch zeigt eine Studie, dass die von Arthropoden absorbierte Energie von der NIS-Frequenz abhängt und dass diese Absorption bei hohen Frequenzen (10 GHz) grösser ist [84], [87]. Obwohl also die vorliegenden experimentellen Studien nicht ausreichen, um auf eine erhöhte Wirkung von Millimeterwellen zu schliessen, wurde diese Hypothese noch nicht ausgeschlossen und muss durch experimentelle Absorptions- und Dosimetrie-Studien evaluiert werden.

Danksagung

Die Autoren möchten Thibault Fiolet für seine Mithilfe und seine Ratschläge zu den Empfehlungen der OHAT, Mathieu Rebeaud und Anthony Guilhur für ihre Hilfe in Sachen Zellstress und Claire Le Bayon für ihre Ratschläge bezüglich der Bodenarthropoden danken.

Finanzierung

Dieses Projekt wurde vom BAFU finanziert, Vertrag 19.0094.PJ / 628D05CDE.

Literaturangaben

- [1] T. Saliev, D. Begimbetova, A.-R. Masoud, et B. Matkarimov, « Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin », *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 141, p. 25-36, janv. 2019, doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.009.
- [2] Académie Suisse des Sciences, « Disparition des insectes en Suisse et conséquences éventuelles pour la société et l'économie ». 2019.
- [3] F. Sánchez-Bayo et K. A. G. Wyckhuys, « Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers », *Biol. Conserv.*, vol. 232, p. 8-27, avr. 2019, doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.020.
- [4] Widmer, Ivo *et al.*, « Insektenvielfalt in der Schweiz: Bedeutung, Trends, Handlungsoptionen », Zenodo, sept. 2021. doi: 10.5281/ZENODO.5144739.
- [5] BERENIS, « Nouvelles directives ICNIRP dans le domaine des hautes fréquences (ICNIRP 2020) ».
- [6] S. Cucurachi, W. L. M. Tamis, M. G. Vijver, W. J. G. M. Peijnenburg, J. F. B. Bolte, et G. R. de Snoo, « A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) », *Environ. Int.*, vol. 51, p. 116-140, janv. 2013, doi: 10.1016/j.envint.2012.10.009.
- [7] A. J. Vanbergen, S. G. Potts, A. Vian, E. P. Malkemper, J. Young, et T. Tscheulin, « Risk to pollinators from anthropogenic electro-magnetic radiation (EMR): Evidence and knowledge gaps », *Sci. Total Environ.*, vol. 695, p. 133833, déc. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133833.
- [8] E. P. Malkemper, T. Tscheulin, A. J. Vanbergen, A. Vian, E. Balian, et L. Goudeseune, « The impacts of artificial Electromagnetic Radiation on wildlife (flora and fauna). Current knowledge overview: a background document to the web conference », 2018.
- [9] European Parliament. Directorate General for Parliamentary Research Services., *Environmental impact of 5G: a literature review of effects of radio frequency electromagnetic field exposure of non human vertebrates, invertebrates and plan.* LU: Publications Office, 2021. Consulté le: 29 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2861/318352>
- [10] A. A. Rooney, A. L. Boyles, M. S. Wolfe, J. R. Bucher, et K. A. Thayer, « Systematic Review and Evidence Integration for Literature-Based Environmental Health Science Assessments », *Environ. Health Perspect.*, vol. 122, n° 7, p. 711-718, juill. 2014, doi: 10.1289/ehp.1307972.
- [11] C. R. Hooijmans, M. M. Rovers, R. B. de Vries, M. Leenaars, M. Ritskes-Hoitinga, et M. W. Langendam, « SYRCLE's risk of bias tool for animal studies », *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 14, n° 1, p. 43, déc. 2014, doi: 10.1186/1471-2288-14-43.
- [12] C. Wang, W. Zhang, Y. Zou, R. Meng, J. Zhao, et M. Wei, « A Sub-100 mg Electromagnetically Driven Insect-inspired Flapping-wing Micro Robot Capable of Liftoff and Control Torques Modulation », *J. Bionic Eng.*, vol. 17, n° 6, p. 1085-1095, nov. 2020, doi: 10.1007/s42235-020-0103-7.
- [13] Y. Zhou, W. Wei, L. Zhu, Y. Li, et Z. Li, « Synthesis and insecticidal activity study of novel anthranilic diamides analogs containing a diacylhydrazine bridge as effective Ca²⁺ modulators », *Chem. Biol. Drug Des.*, vol. 92, n° 5, p. 1914-1919, nov. 2018, doi: 10.1111/cbdd.13349.

- [14] C. García-Mosqueda, A. Cerón garcía, M. D. Salas Araiza, et M. E. Sosa morales, « Radiofrequency heating as an effective alternative for postharvest disinfection: A review for dry foods », *Vitae*, vol. 23, p. S46-S50, 2016.
- [15] R. J. Macana et O. D. Baik, « Disinfection of insect pests in stored agricultural materials using microwave and radio frequency heating: A review », *Food Rev. Int.*, vol. 34, n° 5, p. 483-510, août 2017, doi: 10.1080/87559129.2017.1359840.
- [16] X. Song, B. Ma, X. Kou, R. Li, et S. Wang, « Developing radio frequency heating treatments to control insects in mung beans », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 88, p. 101651, sept. 2020, doi: 10.1016/j.jspr.2020.101651.
- [17] S. Wang, J. Tang, T. Sun, E. J. Mitcham, T. Koral, et S. L. Birla, « Considerations in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts », *J. Food Eng.*, vol. 77, n° 2, p. 304-312, nov. 2006, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.06.037.
- [18] R. Sadeghi, R. M. Moghaddam, et E. Seyedabadi, « Microwave Use in the Control of *Ephesia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae) in Dried Fig and Raisin and Effects on Fruit Sensory Characteristics », *J. Econ. Entomol.*, vol. 111, n° 3, p. 1177--1179, 2018.
- [19] I. A. Ponomaryova, L. N. De Rivera Y Oyarzabal, et E. R. Sánchez, « Interaction of radio-frequency, high-strength electric fields with harmful insects », *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 43, n° 4, p. 43417-43427, 2009.
- [20] L. Shakina, V. Pasiuga, O. Dumin, et Y. Shckorbatov, « Effects of microwaves on the puffing pattern of *D. melanogaster* », *Open Life Sci.*, vol. 6, n° 4, p. 524--530, 2011.
- [21] ICNIRP, « Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz) », *Health Phys.*, vol. 118, n° 5, p. 483-524, mai 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [22] V. Stanojević, Z. Prolić, T. Savić, D. Todorović, et B. Janać, « Effects of Extremely Low Frequency (50 Hz) Magnetic Field on Development Dynamics of the Housefly (*Musca domestica* L.) », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 24, n° 2, p. 99-107, janv. 2005, doi: 10.1080/15368370500205464.
- [23] H. Martin, H. Korall, et B. Forster, « Magnetic field effects on activity and ageing in honeybees », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 164, n° 4, p. 423-431, 1989, doi: 10.1007/bf00610436.
- [24] D. Todorović *et al.*, « The influence of static magnetic field (50 mT) on development and motor behaviour of *Tenebrio* (Insecta, Coleoptera) », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 89, n° 1, p. 44-50, janv. 2013, doi: 10.3109/09553002.2012.715786.
- [25] H. Kawasaki, H. Okano, T. Nedachi, Y. Nakagawa-Yagi, A. Hara, et N. Ishida, « Effects of a 50-Hz electric field on sleep quality and life span mediated by ultraviolet (UV)-A/blue light photoreceptor (CRYPTOCHROME) in *Drosophila melanogaster* », 2020, Consulté le: 1 janvier 9avr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1101/2020.09.23.310862>
- [26] E. Ramirez, J. L. Monteagudo, M. Garcia-Gracia, et J. M. R. Delgado, « Oviposition and development of *Drosophila* modified by magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 4, n° 4, p. 315-326, 1983.
- [27] J. M. Delgado, J. Leal, J. L. Monteagudo, et M. G. Gracia, « Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields. », *J. Anat.*, vol. 134, n° Pt 3, p. 533-551, mai 1982.
- [28] I. Sudaryadi, A. N. Rahmawati, et M. Rizqiyah, « Effect of handphone EMF radiation on survival rate and morphological reproductive organ changes of fruit fly (*Drosophila melanogaster* Meigen, 1830) », 2020. doi: 10.1063/5.0015846.
- [29] K. Darney *et al.*, « Effect of high-frequency radiations on survival of the honeybee (*Apis mellifera* L.) », *Apidologie*, vol. 47, n° 5, p. 703-710, déc. 2015, doi: 10.1007/s13592-015-0421-7.
- [30] K.-S. Lee, J.-S. Choi, S.-Y. Hong, T.-H. Son, et K. Yu, « Mobile phone electromagnetic radiation activates (MAPK) signaling and regulates viability (in *Drosophila*) », *Bioelectromagnetics*, vol. 29, n° 5, p. 371--379, 2008.

- [31] S. E. El Kholy et E. M. El Husseiny, « Effect of 60 minutes exposure to electromagnetic field on fecundity, learning and memory, speed of movement and whole body protein of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. », *J. Egypt. Soc. Parasitol.*, vol. 42, n° 3, p. 639-648, 2012.
- [32] Y. Shckorbatov *et al.*, « *Drosophila melanogaster* viability and mutability under the influence of low energy microwave monochromatic and ultra wideband impulse field - 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques », 2007, Consulté le: 1 janvier 9avr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1109%2Ficatt.2007.4425188>
- [33] A. Yanagawa, K. Kashimura, T. Mitani, N. Shinohara, et T. Yoshimura, « Influence of Powerful Microwaves on the Termite *Coptotermes Formosanus*-Impact of Powerful Microwaves on Insects », in *Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites VI: Ceramic Transactions*, vol. 249, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji, 611-0011, Japan, 2014, p. 367-374. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84927798148&doi=10.1002%2F9781118995433.ch36&partnerID=40&md5=494916cd67222f551684bc40c01da238>
- [34] I. M. Sheiman et M. F. Shkutin, « Effect of weak electromagnetic radiation on larval development and metamorphosis of the yellow mealworm beetle *Tenebrio molitor* », *Biophysics*, vol. 48, n° 1, p. 99-104, 2003.
- [35] D. Weisbrot, H. Lin, L. Ye, M. Blank, et R. Goodman, « Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster* », *J. Cell. Biochem.*, vol. 89, n° 1, p. 48-55, mai 2003, doi: 10.1002/jcb.10480.
- [36] R. Odemer et F. Odemer, « Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success », *Sci. Total Environ.*, vol. 661, p. 553-562, avr. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.154.
- [37] E. D. Chavdoula, D. J. Panagopoulos, et L. H. Margaritis, « Comparison of biological effects between continuous and intermittent exposure to GSM-900-MHz mobile phone radiation: Detection of apoptotic cell-death features », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 700, n° 1-2, p. 51-61, juill. 2010, doi: 10.1016/j.mrgentox.2010.05.008.
- [38] D. J. Panagopoulos, « Effect of Microwave Exposure on the Ovarian Development of *Drosophila melanogaster* », *Cell Biochem. Biophys.*, vol. 63, n° 2, p. 121-132, févr. 2012, doi: 10.1007/s12013-012-9347-0.
- [39] D. J. Panagopoulos, E. D. Chavdoula, I. P. Nezis, et L. H. Margaritis, « Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 626, n° 1-2, p. 69-78, janv. 2007, doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.08.008.
- [40] J. A. Valadez-Lira *et al.*, « Alterations of Immune Parameters on *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) Larvae Exposed to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields », *Environ. Entomol.*, vol. 46, n° 2, p. 376--382, 2017.
- [41] J. R. Diebolt, « The influence of electrostatic and magnetic fields on mutation in *Drosophila melanogaster* spermatozoa », *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.*, vol. 57, n° 2, p. 169-174, janv. 1978, doi: 10.1016/0027-5107(78)90264-6.
- [42] Y. Hamnerius, Å. Rasmuson, et B. Rasmuson, « Biological effects of high-frequency electromagnetic fields on *Salmonella typhimurium* and *Drosophila melanogaster* », *Bioelectromagnetics*, vol. 6, n° 4, p. 405-414, 1985, doi: 10.1002/bem.2250060407.
- [43] Y. Hamnerius, H. Olofsson, Å. Rasmuson, et B. Rasmuson, « A negative test for mutagenic action of microwave radiation in *Drosophila melanogaster* », *Mutat. Res. Toxicol.*, vol. 68, n° 3, p. 217-223, nov. 1979, doi: 10.1016/0165-1218(79)90153-8.
- [44] P. G. Kale et J. W. Baum, « Genetic effects of strong magnetic fields in *Drosophila melanogaster* », *Mutat. Res. Lett.*, vol. 105, n° 1-2, p. 79-83, août 1982, doi: 10.1016/0165-7992(82)90211-1.

- [45] M. C. Rosi *et al.*, « Emigration Effects Induced by Radio Frequency Treatment to Dates Infested by *Carpophilus hemipterus* », *Insects*, vol. 10, n° 9, p. 273, août 2019, doi: 10.3390/insects10090273.
- [46] J. ONDRÁČEK, J. ŽDÁREK, V. LANDA, et J. DATLOV, « Importance of antennae for orientation of insects in a non-uniform microwave electromagnetic field », *Nature*, vol. 260, n° 5551, p. 522-523, avr. 1976, doi: 10.1038/260522a0.
- [47] M. Frątczak *et al.*, « Infected Ixodes ricinus ticks are attracted by electromagnetic radiation of 900 MHz », *Ticks Tick-Borne Dis.*, vol. 11, n° 4, p. 101416, juill. 2020, doi: 10.1016/j.ttbdis.2020.101416.
- [48] B. Vargová *et al.*, « Electromagnetic radiation and behavioural response of ticks: an experimental test », *Exp. Appl. Acarol.*, vol. 75, n° 1, p. 85-95, mai 2018, doi: 10.1007/s10493-018-0253-z.
- [49] J. Wyszowska, S. Shepherd, S. Sharkh, C. W. Jackson, et P. L. Newland, « Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behaviour, physiology and stress protein levels of desert locusts », *Sci. Rep.*, vol. 6, n° 1, nov. 2016, doi: 10.1038/srep36413.
- [50] A. H. Poh *et al.*, « Effects of low-powered RF sweep between 0.01-20 GHz on female *Aedes Aegypti* mosquitoes: A collective behaviour analysis », *PLOS ONE*, vol. 12, n° 6, p. e0178766, juin 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0178766.
- [51] C. G. Liddle *et al.*, « Effect of 9.6-{GHz} pulsed microwaves on the orb web spinning ability of the cross spider (*Araneus diadematus*) », *Bioelectromagnetics*, vol. 7, n° 1, p. 101--105, 1986.
- [52] P. Bartos, R. Netušil, P. Slaby, D. Dolezel, T. Ritz, et M. Vacha, « Weak radiofrequency fields affect the insect circadian clock », *J. R. Soc. Interface*, vol. 16, n° 158, p. 20190285, sept. 2019, doi: 10.1098/rsif.2019.0285.
- [53] G. Fedele, E. W. Green, E. Rosato, et C. P. Kyriacou, « An electromagnetic field disrupts negative geotaxis in *Drosophila* via a {CRY}-dependent pathway », *Nat. Commun.*, vol. 5, n° 1, 2014, Consulté le: 1 janvier 7 apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038%2Fncomms5391>
- [54] S. Shepherd, C. W. Jackson, S. M. Sharkh, H. Aonuma, E. E. Oliveira, et P. L. Newland, « Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Entrain Locust Wingbeats », *Bioelectromagnetics*, vol. 42, n° 4, p. 296-308, avr. 2021, doi: 10.1002/bem.22336.
- [55] C. Wan, A. Yao, et L. Van Gool, « Direction matters: hand pose estimation from local surface normals », avr. 2016, Consulté le: 19 avril 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://arxiv.org/abs/1604.02657v1>
- [56] M. C. Pereira, I. de C. Guimarães, D. Acosta-Avalos, et W. F. A. Junior, « Can altered magnetic field affect the foraging behaviour of ants? », *PLOS ONE*, vol. 14, n° 11, p. e0225507, nov. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0225507.
- [57] M.-C. Cammaerts, Z. Rachidi, F. Bellens, et P. D. Doncker, « Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electromagnetic radiation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 32, n° 3, p. 315-332, janv. 2013, doi: 10.3109/15368378.2012.712877.
- [58] N. G. Lopatina, T. G. Zachepilo, N. G. Kamyshev, N. A. Dyuzhikova, et I. N. Serov, « Effect of Non-Ionizing Electromagnetic Radiation on Behavior of the Honeybee, *Apis mellifera* L. (Hymenoptera, Apidae) », *Entomol. Rev.*, vol. 99, n° 1, p. 24--29, 2019.
- [59] V. P. Sharma et N. R. Kumar, « Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations », *Curr. Sci.*, vol. 98, n° 10, p. 1376-1378, 2010.
- [60] Y. Erdoğlan et M. M. Cengiz, « Effect of Electromagnetic Field (EMF) and Electric Field (EF) on Some Behavior of Honeybees (*Apis mellifera* L.) », avr. 2019, doi: 10.1101/608182.
- [61] V. P. Bindokas, J. R. Gauger, et B. Greenberg, « Laboratory investigations of the electrical characteristics of honey bees and their exposure to intense electric fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 10, n° 1, p. 1--12, 1989.
- [62] D. D. Wiegmann, P. Casto, E. A. Hebets, et V. P. Bingman, « Distortion of the local magnetic field appears to neither disrupt nocturnal navigation nor cue shelter

- recognition in the amblypygid *Paraphrynus laevifrons* », *Ethology*, vol. 126, n° 4, p. 403-412, déc. 2019, doi: 10.1111/eth.12985.
- [63] G. Wan *et al.*, « Geomagnetic field intensity as a cue for the regulation of insect migration », 2019, Consulté le: 1 janvier 8avr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1101/2F733782>
- [64] T. E. Ferrari, « Magnets, magnetic field fluctuations and geomagnetic disturbances impair the homing ability of honey bees (*Apis mellifera*) », *J. Apic. Res.*, vol. 53, n° 4, p. 452-465, janv. 2014, doi: 10.3896/ibra.1.53.4.15.
- [65] R. Wehner et Th. Labhart, « Perception of the geomagnetic field in the {fly *Drosophila*} *melanogaster* », *Experientia*, vol. 26, n° 9, p. 967--968, 1970.
- [66] D. Acosta-Avalos, A. Pinho, ra Tourinho, J. de Souza Barbosa, et N. Belova, « Alternating Magnetic Fields of 60~Hz Affect Magnetic Orientation and Magnetosensitivity of Fire Ants », *J. Insect Behav.*, vol. 28, n° 6, p. 664--673, 2015.
- [67] R. B. Srygley, R. Dudley, E. Oliveira, ro G., et A. J. Riveros, « Experimental evidence for a magnetic sense in Neotropical migrating butterflies (Lepidoptera: Pieridae) », *Anim. Behav.*, vol. 71, n° 1, p. 183--191, 2006.
- [68] H. Schiff, « Modulation of spike frequencies by varying the ambient magnetic field and magnetite candidates in bees (*Tapis mellifera*) », *Comp. Biochem. Physiol. A Physiol.*, vol. 100, n° 4, p. 975--985, 1991.
- [69] M.-C. Cammaerts, V, G. A. E. enbosch, et V. Volski, « Effect of Short-Term {GSM} Radiation at Representative Levels in Society on a Biological Model: The Ant *Myrmica sabuleti* », *J. Insect Behav.*, vol. 27, n° 4, p. 514--526, 2014.
- [70] K. Luo *et al.*, « High-voltage electrostatic field-induced oxidative stress: Characterization of the physiological effects in *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) across multiple generations », *Bioelectromagnetics*, vol. 40, n° 1, p. 52--61, 2018.
- [71] M. Jankowska, A. Pawlowska-Mainville, M. Stankiewicz, J. Rogalska, et J. Wyszowska, « Exposure to 50 Hz electromagnetic field changes the efficiency of the scorpion alpha toxin », *J. Venom. Anim. Toxins Trop. Dis.*, vol. 21, n° 1, sept. 2015, doi: 10.1186/s40409-015-0040-9.
- [72] M. R. Martel et M. A. Alikhan, « The effect of magnetic field intensities on the oxygen consumption {in *Porcellio*} {*laevis* Latre} (Oniscoidea, Isopoda) », *Arch. Int. Physiol. Biochim.*, vol. 90, n° 2, p. 111--122, 1982.
- [73] J. Kefuss, K. M{\textquotesingle}Diaye, M. Bounias, J. Vanpoucke, et J. Ecochard, « Biochemical effects of high intensity constant magnetic fields on worker honey bees », *Bioelectromagnetics*, vol. 20, n° 2, p. 117--122, 1999.
- [74] D. Yu, B. Shrestha, et O.-D. Baik, « Thermal death kinetics of adult red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) in canola seeds during radio frequency heating », *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, n° 12, p. 3064-3075, avr. 2017, doi: 10.1080/10942912.2016.1272609.
- [75] D. N. Yadav, T. Anand, M. Sharma, et R. K. Gupta, « Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, n° 12, p. 3568-3576, déc. 2014, doi: 10.1007/s13197-012-0912-8.
- [76] S. V. Gaikwad et A. N. Gaikwad, « RF and microwave low power dielectric heating using parallel plate applicator to control insect pests on tomato plant », *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 49, p. 81-89, 2016.
- [77] R. G. Olsen, « Constant-dose microwave irradiation of insect pupae », *Radio Sci.*, vol. 17, n° 5S, p. 145S-148S, sept. 1982, doi: 10.1029/rs017i05sp0145s.
- [78] P. Piyasena, C. Dussault, T. Koutchma, H. S. Ramaswamy, et G. B. Awuah, « Radio Frequency Heating of Foods: Principles, Applications and Related Properties—A Review », *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 43, n° 6, p. 587-606, oct. 2003, doi: 10.1080/10408690390251129.
- [79] S. Wang *et al.*, « Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments », *Biosyst. Eng.*, vol. 85, n° 2, p. 201-212, juin 2003, doi: 10.1016/S1537-5110(03)00042-4.

- [80] M. R. Hossan et P. Dutta, « Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, n° 13-14, p. 3412-3422, juin 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.072.
- [81] R. Torrealba-Meléndez, M. E. Sosa-Morales, J. L. Olvera-Cervantes, et A. Corona-Chávez, « Dielectric properties of cereals at frequencies useful for processes with microwave heating », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, n° 12, p. 8403-8409, déc. 2015, doi: 10.1007/s13197-015-1948-3.
- [82] S. Kodera et A. Hirata, « Comparison of Thermal Response for RF Exposure in Human and Rat Models », *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, n° 10, p. 2320, oct. 2018, doi: 10.3390/ijerph15102320.
- [83] A. Hirata, S. Kodera, J. Wang, et O. Fujiwara, « Dominant factors influencing whole-body average {SAR} due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and {GHz} regions », *Bioelectromagnetics*, vol. 28, n° 6, p. 484--487, 2007.
- [84] A. Thielens, M. K. Greco, L. Verloock, L. Martens, et W. Joseph, « Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees », *Sci. Rep.*, vol. 10, n° 1, janv. 2020, doi: 10.1038/s41598-019-56948-0.
- [85] Z. Huang, L. Chen, et S. Wang, « Computer simulation of radio frequency selective heating of insects in soybeans », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 90, p. 406-417, nov. 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.071.
- [86] S. Wang, J. Tang, R. P. Cavalieri, et D. C. Davis, « DIFFERENTIAL HEATING OF INSECTS IN DRIED NUTS AND FRUITS ASSOCIATED WITH RADIO FREQUENCY AND MICROWAVE TREATMENTS », *Trans. ASAE*, vol. 46, n° 4, 2003, doi: 10.13031/2013.13941.
- [87] L. Mykhaylova, A. Ryd, P. Potapski, N. Kosulina, et A. Cherenkov, « Determining the electromagnetic field parameters to kill flies at livestock facilities », *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 4, n° 5 (94), p. 53-60, juill. 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.137600.
- [88] M. Vácha, T. Půžová, et M. Kvíčalová, « Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach », *J. Exp. Biol.*, vol. 212, n° 21, p. 3473-3477, 2009.
- [89] D. Todorović *et al.*, « Effect of magnetic fields on antioxidative defense and fitness-related traits of *Baculum extrudentatum* (insecta, phasmatodea) », *Bioelectromagnetics*, vol. 33, n° 3, p. 265-273, avr. 2012, doi: 10.1002/bem.20709.
- [90] Z.-Y. Zhang *et al.*, « Coupling Mechanism of Electromagnetic Field and Thermal Stress on *Drosophila melanogaster* », *PLOS ONE*, vol. 11, n° 9, p. e0162675, sept. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0162675.
- [91] A. Michel et H. O. Gutzeit, « Electromagnetic Fields in Combination with Elevated Temperatures Affect Embryogenesis of *Drosophila* », *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 265, n° 1, p. 73--78, 1999.
- [92] D. Lupi *et al.*, « Effects of Pesticides and Electromagnetic Fields on Honeybees: A Field Study Using Biomarkers », *Int. J. Environ. Res.*, vol. 14, n° 1, p. 107--122, 2020.
- [93] B. Greenberg et N. Ash, « Extreme Low Frequency Electromagnetic Fields of Project Sanguine/Seafarer: Effect of Long-term Exposure on Soil Arthropods in Nature », *Environ. Entomol.*, vol. 5, n° 6, p. 1033-1039, déc. 1976, doi: 10.1093/ee/5.6.1033.
- [94] A. Lázaro, A. Chroni, T. Tscheulin, J. Devalez, C. Matsoukas, et T. Petanidou, « Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators », *J. Insect Conserv.*, vol. 20, n° 2, p. 315-324, avr. 2016, doi: 10.1007/s10841-016-9868-8.
- [95] R. J. Stout et M. P. Rondinelli, « Stream-dwelling insects and extremely low frequency electromagnetic fields: a ten-year study », *Hydrobiologia*, vol. 302, n° 3, p. 197-213, avr. 1995, doi: 10.1007/bf00032110.
- [96] D. J. Panagopoulos, E. D. Chavdoula, A. Karabarbounis, et L. H. Margaritis, « Comparison of Bioactivity Between GSM 900 MHz and DCS 1800 MHz Mobile Telephony Radiation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 26, n° 1, p. 33-44, janv. 2007, doi: 10.1080/15368370701205644.

- [97] Md. S. Islam, « Calcium Signaling: From Basic to Bedside », in *Calcium Signaling*, vol. 1131, Md. S. Islam, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 1-6. doi: 10.1007/978-3-030-12457-1_1.
- [98] Y. Moran, M. G. Barzilai, B. J. Liebeskind, et H. H. Zakon, « Evolution of voltage-gated ion channels at the emergence of Metazoa », *J. Exp. Biol.*, vol. 218, n° 4, p. 515-525, févr. 2015, doi: 10.1242/jeb.110270.
- [99] F. Bertagna, R. Lewis, S. R. P. Silva, J. McFadden, et K. Jeevaratnam, « Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: a systematic review », *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1499, n° 1, p. 82-103, sept. 2021, doi: 10.1111/nyas.14597.
- [100] A. Wood et K. Karipidis, « Radiofrequency Fields and Calcium Movements Into and Out of Cells », *Radiat. Res.*, vol. 195, n° 1, nov. 2020, doi: 10.1667/RADE-20-00101.1.
- [101] L. A. Golbach *et al.*, « Calcium homeostasis and low-frequency magnetic and electric field exposure: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies », *Environ. Int.*, vol. 92-93, p. 695-706, juill. 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.01.014.
- [102] M. K. Moghadam, M. Firoozabadi, et M. Janahmadi, « Effects of weak environmental magnetic fields on the spontaneous bioelectrical activity of snail neurons », *J. Membr. Biol.*, vol. 240, n° 2, p. 63-71, mars 2011, doi: 10.1007/s00232-011-9344-z.
- [103] I. Marchionni *et al.*, « Comparison between low-level 50 Hz and 900 MHz electromagnetic stimulation on single channel ionic currents and on firing frequency in dorsal root ganglion isolated neurons », *Biochim. Biophys. Acta BBA - Biomembr.*, vol. 1758, n° 5, p. 597-605, mai 2006, doi: 10.1016/j.bbamem.2006.03.014.
- [104] W. N. Ross, « Understanding calcium waves and sparks in central neurons », *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 13, n° 3, p. 157-168, mars 2012, doi: 10.1038/nrn3168.
- [105] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « Mobile telephony radiation effects on living organisms », in *Radiation Exposure in Medicine and the Environment: Risks and Protective Strategies*, Department of Cell Biology and Biophysics, Faculty of Biology, University of Athens, Panepistimiopolis, 15784, Athens, Greece, 2011, p. 185-228. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892009543&partnerID=40&md5=86dbe1e156c8b8a06f8aa529137e09c9>
- [106] L. Makinistian, D. J. Muehsam, F. Bersani, et I. Belyaev, « Some recommendations for experimental work in magnetobiology, revisited: Recommendations for Magnetobiology Research », *Bioelectromagnetics*, vol. 39, n° 7, p. 556-564, oct. 2018, doi: 10.1002/bem.22144.
- [107] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren, et L. Martens, « Assessment of {RF} Exposures from Emerging Wireless Communication Technologies in Different Environments », *Health Phys.*, vol. 102, n° 2, p. 161--172, 2012.
- [108] D. Colombi, B. Thors, et C. Tornevik, « Implications of {EMF} Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices Above 6~{GHz} », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, p. 1247--1249, 2015.
- [109] C. W. Jackson, E. Hunt, S. Sharkh, et P. L. Newland, « Static electric fields modify the locomotory behaviour of cockroaches », *J. Exp. Biol.*, vol. 214, n° 12, p. 2020-2026, juin 2011, doi: 10.1242/jeb.053470.
- [110] L. Li, M. C. Vuran, et I. F. Akyildiz, « Akyildiz, Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks », 2007.
- [111] R. L. van Dam, B. Borchers, et J. M. H. Hendrickx, « Methods for prediction of soil dielectric properties: a review », Orlando, Florida, USA, juin 2005, p. 188. doi: 10.1117/12.602868.
- [112] X. Yu, P. Wu, Z. Zhang, N. Wang, et W. Han, « ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN SOIL FOR WIRELESS UNDERGROUND SENSOR NETWORKS », *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 30, p. 11-23, 2013, doi: 10.2528/PIERM12110609.
- [113] P. Joshi, F. Ghasemifard, D. Colombi, et C. Tornevik, « Actual Output Power Levels of User Equipment in 5G Commercial Networks and Implications on Realistic RF EMF

- Exposure Assessment », *IEEE Access*, vol. 8, p. 204068-204075, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036977.
- [114] B. Selmaoui, P. Mazet, P. Petit, K. Kim, D. Choi, et R. Seze, « Exposure of South Korean Population to 5G Mobile Phone Networks (3.4–3.8 GHz) », *Bioelectromagnetics*, vol. 42, n° 5, p. 407-414, juill. 2021, doi: 10.1002/bem.22345.
- [115] S. Aerts *et al.*, « In Situ Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure in a Commercial Network in Bern, Switzerland », *Appl. Sci.*, vol. 11, n° 8, p. 3592, avr. 2021, doi: 10.3390/app11083592.
- [116] G. Vorobyov, L. Vietzorreck, I. Barsuk, et A. Rybalko, *The Diffraction of Electromagnetic Waves on the Periodic Heterogeneities and Its Use for Realization of Practical Technical and Electronic Devices of Millimeter and Submillimeter Wavelength Range*. IntechOpen, 2012. doi: 10.5772/50694.
- [117] D. Lupi *et al.*, « Combined Effects of Pesticides and Electromagnetic-Fields on Honeybees: Multi-Stress Exposure », *Insects*, vol. 12, n° 8, p. 716, août 2021, doi: 10.3390/insects12080716.
- [118] P. Arias *et al.*, « Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary », 2021.
- [119] D. González-Tokman, A. Córdoba-Aguilar, W. Dáttilo, A. Lira-Noriega, R. A. Sánchez-Guillén, et F. Villalobos, « Insect responses to heat: physiological mechanisms, evolution and ecological implications in a warming world », *Biol. Rev.*, vol. 95, n° 3, p. 802-821, juin 2020, doi: 10.1111/brv.12588.
- [120] J. G. Kingsolver, S. E. Diamond, et L. B. Buckley, « Heat stress and the fitness consequences of climate change for terrestrial ectotherms », *Funct. Ecol.*, vol. 27, n° 6, p. 1415-1423, déc. 2013, doi: 10.1111/1365-2435.12145.
- [121] J. Krauss *et al.*, « Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels: Immediate and time-delayed biodiversity loss », *Ecol. Lett.*, vol. 13, n° 5, p. 597-605, avr. 2010, doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01457.x.
- [122] S. Seibold *et al.*, « Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers », *Nature*, vol. 574, n° 7780, p. 671-674, oct. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1684-3.
- [123] C. A. Hallmann, A. Ssymank, M. Sorg, H. de Kroon, et E. Jongejans, « Insect biomass decline scaled to species diversity: General patterns derived from a hoverfly community », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, n° 2, p. e2002554117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002554117.
- [124] C. A. Hallmann *et al.*, « More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas », *PLOS ONE*, vol. 12, n° 10, p. e0185809, oct. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0185809.
- [125] A. C. S. Owens, P. Cochard, J. Durrant, B. Farnworth, E. K. Perkin, et B. Seymoure, « Light pollution is a driver of insect declines », *Biol. Conserv.*, vol. 241, p. 108259, janv. 2020, doi: 10.1016/j.biocon.2019.108259.
- [126] P. Soroye, T. Newbold, et J. Kerr, « Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents », *Science*, vol. 367, n° 6478, p. 685-688, févr. 2020, doi: 10.1126/science.aax8591.
- [127] R. van Klink, D. E. Bowler, K. B. Gongalsky, A. B. Swengel, A. Gentile, et J. M. Chase, « Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances », *Science*, vol. 368, n° 6489, p. 417-420, avr. 2020, doi: 10.1126/science.aax9931.
- [128] C. A. Halsch *et al.*, « Insects and recent climate change », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, n° 2, p. e2002543117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002543117.
- [129] P. H. Raven et D. L. Wagner, « Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, n° 2, p. e2002548117, janv. 2021, doi: 10.1073/pnas.2002548117.

- [130] J. C. Habel, A. Segerer, W. Ulrich, O. Torchyk, W. W. Weisser, et T. Schmitt, « Butterfly community shifts over two centuries: Shifts in Butterfly Communities », *Conserv. Biol.*, vol. 30, n° 4, p. 754-762, août 2016, doi: 10.1111/cobi.12656.
- [131] D. E. Bowler, H. Heldbjerg, A. D. Fox, M. Jong, et K. Böhning-Gaese, « Long-term declines of European insectivorous bird populations and potential causes », *Conserv. Biol.*, vol. 33, n° 5, p. 1120-1130, oct. 2019, doi: 10.1111/cobi.13307.
- [132] J. Kamp *et al.*, « Population trends of common breeding birds in Germany 1990–2018 », *J. Ornithol.*, vol. 162, n° 1, p. 1-15, janv. 2021, doi: 10.1007/s10336-020-01830-4.
- [133] Z. Benedek, F. Jordán, et A. Báldi, « Topological keystone species complexes in ecological interaction networks », *Community Ecol.*, vol. 8, n° 1, p. 1-7, déc. 2007, doi: 10.1556/ComEc.8.2007.1.1.
- [134] V. I. Makarov et I. Khmelinskii, « External control of {theDrosophila} melanogaster egg to imago development period by specific combinations of 3D low-frequency electric and magnetic fields », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 35, n° 1, p. 15--29, 2014.
- [135] V. P. Bindokas, J. R. Gauger, et B. Greenberg, « 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*, vol. 9, n° 3, p. 285--301, 1988.
- [136] D. J. Panagopoulos, A. Karabarbounis, et C. Lioliousis, « ELF Alternating Magnetic Field Decreases Reproduction by DNA Damage Induction », *Cell Biochem. Biophys.*, vol. 67, n° 2, p. 703-716, mars 2013, doi: 10.1007/s12013-013-9560-5.
- [137] T. Kikuchi, M. Ogawa, Y. Otaka, et M. Furuta, « Multigeneration exposure test of *Drosophila melanogaster* to ELF magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 19, n° 6, p. 335-340, 1998, doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1998)19:6<335::aid-bem1>3.0.co;2-2.
- [138] K.-S. Chae, « An extremely low frequency magnetic field increases unconditioned larval movement of the common cutworm, *Spodoptera litura*: A novel model for a magnetoreceptive neurobehavioral study », *Entomol. Res.*, vol. 38, n° 4, p. 299-302, déc. 2008, doi: 10.1111/j.1748-5967.2008.00190.x.
- [139] D. Todorović *et al.*, « The impact of chronic exposure to a magnetic field on energy metabolism and locomotion of *Blaptica dubia* », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 96, n° 8, p. 1076-1083, août 2020, doi: 10.1080/09553002.2020.1770360.
- [140] M. Stamenković-Radak, I. Kitanović, Z. Prolić, I. Tomisić, B. Stojković, et M. Andjelkovic, « Effect of a permanent magnetic field on wing size parameters in *Drosophila melanogaster* », *Bioelectromagnetics*, vol. 22, n° 5, p. 365-369, juill. 2001, doi: 10.1002/bem.63.
- [141] J. H. Graham, D. Fletcher, J. Tigue, et M. McDonald, « Growth and developmental stability {ofDrosophila} melanogaster in low frequency magnetic fields », *Bioelectromagnetics*, vol. 21, n° 6, p. 465--472, 2000.
- [142] T.-H. Ma et K.-C. Chu, « Effect of the extremely low frequency (ELF) electromagnetic field (EMF) on developing embryos of the fruit fly (*Drosophila melanogaster* L.) », *Mutat. Res. Lett.*, vol. 303, n° 1, p. 35-39, sept. 1993, doi: 10.1016/0165-7992(93)90006-H.
- [143] G. Becker, « Reaction of termites to weak alternating magnetic fields », *Naturwissenschaften*, vol. 63, n° 4, p. 201--202, 1976.
- [144] S. Geronikolou, S. Zimeras, C. H. Davos, I. Michalopoulos, et S. Tsitomeneas, « Diverse Radiofrequency Sensitivity and Radiofrequency Effects of Mobile or Cordless Phone near Fields Exposure in *Drosophila melanogaster* », *PLoS ONE*, vol. 9, n° 11, p. e112139, nov. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0112139.
- [145] L. H. Margaritis *et al.*, « *Drosophila* oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 33, n° 3, p. 165-189, sept. 2014, doi: 10.3109/15368378.2013.800102.
- [146] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony radiation », *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 699, n° 1-2, p. 17-22, juin 2010, doi: 10.1016/j.mrgentox.2010.04.010.

- [147] D. J. Panagopoulos et L. H. Margaritis, « The identification of an intensity 'window' on the bioeffects of mobile telephony radiation », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 86, n° 5, p. 358-366, avr. 2010, doi: 10.3109/09553000903567979.
- [148] D. J. Panagopoulos, A. Karabarounis, et L. H. Margaritis, « Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster* », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 23, n° 1, p. 29-43, 2004.
- [149] N. E. Sagioglou, A. K. Manta, I. K. Giannarakis, A. S. Skouroliakou, et L. H. Margaritis, « Apoptotic cell death {during *Drosophila* oogenesis} is differentially increased by electromagnetic radiation depending on modulation, intensity and duration of exposure », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 35, n° 1, p. 40--53, 2014.
- [150] M. Vilić *et al.*, « Effects of short-term exposure to mobile phone radiofrequency (900 MHz) on the oxidative response and genotoxicity in honey bee larvae », *J. Apic. Res.*, vol. 56, n° 4, p. 430-438, août 2017, doi: 10.1080/00218839.2017.1329798.
- [151] M. G. Vijver *et al.*, « Investigating short-term exposure to electromagnetic fields on reproductive capacity of invertebrates in the field situation », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 33, n° 1, p. 21--28, 2013.
- [152] E. Atli et H. Ünlü, « The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development of *Drosophila melanogaster* », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 82, n° 6, p. 435-441, janv. 2006, doi: 10.1080/09553000600798849.
- [153] E. Atli et H. Ünlü, « The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the fecundity of *Drosophila melanogaster* », *Turk. J. Biol.*, vol. 31, n° 1, p. 1-5, 2007.
- [154] D. Pandir et R. Sahingoz, « Magnetic field-induced oxidative stress and DNA damage in Mediterranean flour moth *Ephesia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) larvae », *J. Pest Sci.*, vol. 87, n° 1, p. 79-87, sept. 2013, doi: 10.1007/s10340-013-0521-y.
- [155] T. R. Tegenkamp, *Mutagenic Effects of Magnetic Fields on Drosophila Melanogaster - Biological Effects of Magnetic Fields*. Springer {US}, 1969. [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1007%2F978-1-4684-8352-9_13
- [156] A. Yanagawa *et al.*, « Impact of 2.45 GHz Microwave Irradiation on the Fruit Fly, *Drosophila melanogaster* », *Insects*, vol. 11, n° 9, p. 598, sept. 2020, doi: 10.3390/insects11090598.
- [157] S. Mittler, « Failure of chronic exposure to nonthermal {FM} radio waves to mutate *Drosophila* », *J. Hered.*, vol. 68, n° 4, p. 257--258, 1977.
- [158] D. J. Panagopoulos, « Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields », *Mutat. Res. Mutat. Res.*, vol. 781, p. 53-62, juill. 2019, doi: 10.1016/j.mrrev.2019.03.003.
- [159] L. D. Dyka, L. A. Shakina, V. Yu. Strashnyuk, et Y. G. Shckorbatov, « Effects of 36.6 {GHz} and static magnetic field on degree of endoreduplication {in *Drosophila*} melanogaster polytene chromosomes », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 92, n° 4, p. 222--227, 2016.
- [160] D. Todorović, Z. Prolić, B. Petković, et A. Kalauzi, « Effects of two different waveforms of ELF MF on bioelectrical activity of antennal lobe neurons of *Morimus funereus* (Insecta, Coleoptera) », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 91, n° 5, p. 435-442, févr. 2015, doi: 10.3109/09553002.2015.1004467.
- [161] M. Vácha, D. Drštková, et T. Půžová, « *Tenebrio* beetles use magnetic inclination compass », *Naturwissenschaften*, vol. 95, n° 8, p. 761-765, avr. 2008, doi: 10.1007/s00114-008-0377-9.
- [162] M. Kisliuk et J. S. Ishay, « Influence of the earth's magnetic field on the comb building orientation of hornets », *Experientia*, vol. 35, n° 8, p. 1041-1042, août 1979, doi: 10.1007/bf01949929.
- [163] S. Shepherd *et al.*, « Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields impair the Cognitive and Motor Abilities of Honey Bees », *Sci. Rep.*, vol. 8, n° 1, 2018, Consulté le: 1 janvier 5 apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038%2Fs41598-018-26185-y>

- [164] S. Shepherd *et al.*, « Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields », *PLoS One*, vol. 14, n° 10, p. e0223614, 2019.
- [165] M. Kisliuk et J. Ishay, « Influence of an additional magnetic field on hornet nest architecture », *Experientia*, vol. 33, n° 7, p. 885--887, 1977.
- [166] J. V. Perumpral, U. F. Earp, et J. M. Stanley, « Effects of Electrostatic Field on Locational Preference of House Flies 1 and Flight Activities of Cabbage Loopers 23 », *Environ. Entomol.*, vol. 7, n° 3, p. 482--486, 1978.
- [167] D. K. Edwards, « EFFECTS OF ARTIFICIALLY PRODUCED ATMOSPHERIC ELECTRICAL FIELDS UPON THE ACTIVITY OF SOME ADULT DIPTERA », *Can. J. Zool.*, vol. 38, n° 5, p. 899-912, oct. 1960, doi: 10.1139/z60-096.
- [168] R. J. Stout, « Responses to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields by a Dragonfly Naiad (*Ophiogomphus colubrinus*) in a Northern Michigan Stream: A Five Year Study », *J. Freshw. Ecol.*, vol. 7, n° 4, p. 343--352, 1992.
- [169] B. Greenberg, « Impact of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Soil Arthropods », *Environ. Entomol.*, vol. 1, n° 6, p. 743--750, 1972.
- [170] T. Leucht, « Responses to light under varying magnetic conditions in the honeybee, *Apis mellifica* », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 154, n° 6, p. 865-870, 1984, doi: 10.1007/bf00610687.
- [171] M.-C. Cammaerts, P. D. Doncker, X. Patris, F. Bellens, Z. Rachidi, et D. Cammaerts, « GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 31, n° 2, p. 151-165, janv. 2012, doi: 10.3109/15368378.2011.624661.
- [172] D. Favre, « Mobile phone-induced honeybee worker piping », *Apidologie*, vol. 42, n° 3, p. 270--279, 2011.
- [173] N. E. Gary et B. B. Westerdahl, « Flight, orientation, and homing abilities of honeybees following exposure to 2.45-{GHz} {CW} microwaves », *Bioelectromagnetics*, vol. 2, n° 1, p. 71--75, 1981.
- [174] G.-J. Wan *et al.*, « Reduced geomagnetic field may affect positive phototaxis and flight capacity of a migratory rice planthopper », *Anim. Behav.*, vol. 121, p. 107-116, nov. 2016, doi: 10.1016/j.anbehav.2016.08.024.
- [175] V. M. Orlov, « Invertebrates and High-Voltage Powerlines », *J. Bioelectr.*, vol. 9, n° 2, p. 121--131, 1990.
- [176] K. Tomanova et M. Vacha, « The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields », *J. Exp. Biol.*, 2016, Consulté le: 1 janvier 1apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1242/jeb.132878>
- [177] E. K. Eskov, « Destabilization of the insect heart function by low-frequency electric field », *Biophysics*, vol. 51, n° 1, p. 122-124, janv. 2006, doi: 10.1134/S0006350906010192.
- [178] S. Spasić, S. Kesić, G. Stojadinović, B. Petković, et D. Todorović, « Effects of the static and ELF magnetic fields on the neuronal population activity in *Morimus funereus* (Coleoptera, Cerambycidae) antennal lobe revealed by wavelet analysis », *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.*, vol. 181, p. 27-35, mars 2015, doi: 10.1016/j.cbpa.2014.11.018.
- [179] L. Ilijin *et al.*, « The response of dorsomedial A1' and dorsolateral L2' neurosecretory neurons of *Lymantria dispar* L. caterpillars to the acute effects of magnetic fields », *Arch. Biol. Sci.*, vol. 63, n° 1, p. 167--176, 2011.
- [180] L. Ilijin *et al.*, « The effects of acute exposure to magnetic fields on morphometric characteristics of bombyxin-producing neurosecretory neurons in gypsy moth caterpillars », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 87, n° 5, p. 461-471, mai 2011, doi: 10.3109/09553002.2011.542544.
- [181] A. K. Manta *et al.*, « Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster* », *Fly (Austin)*, vol. 11, n° 2, p. 75--95, 2017.

- [182] J. Wyszowska, M. Jankowska, et M. Stankiewicz, « Comprehensive study of the effects of electromagnetic field exposure on nervous system using insect models », sept. 2018. doi: 10.23919/emf-med.2018.8526060.
- [183] Z. Prolić, R. Jovanović, G. Konjević, et B. Janać, « Behavioral Differences of the Insect *Morimus funereus* (Coleoptera, Cerambycidae) Exposed to an Extremely Low Frequency Magnetic Field », *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 22, n° 1, p. 63-73, janv. 2003, doi: 10.1081/jbc-120020358.
- [184] D. Zmejkoski, B. Petković, S. Pavković-Lučić, Z. Prolić, M. Anđelković, et T. Savić, « Different responses of *Drosophila subobscura* isofemale lines to extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT): fitness components and locomotor activity », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 93, n° 5, p. 544-552, mai 2017, doi: 10.1080/09553002.2017.1268281.
- [185] D. Dimitrijević, T. Savić, M. Anđelković, Z. Prolić, et B. Janać, « Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) modifies fitness components and locomotor activity of *Drosophila subobscura* », *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 90, n° 5, p. 337-343, mai 2014, doi: 10.3109/09553002.2014.888105.
- [186] Z. M. Prolić et V. Nenadović, « The influence of a permanent magnetic field on the process of adult emergence in *Tenebrio molitor* », *J. Insect Physiol.*, vol. 41, n° 12, p. 1113-1118, déc. 1995, doi: 10.1016/0022-1910(95)00061-X.
- [187] M. A. Seada, S. E. Elkholy, et W. S. Meshrif, « Does the cellphone radio-frequency electromagnetic radiation during ringing or talking modes induce locomotor disturbance {in *Drosophila*} *melanogaster*? », *Afr. Zool.*, vol. 51, n° 1, p. 53--60, 2016.
- [188] V. Bindokas et B. Greenberg, « Biological effects of a 765-{kV}, 60-Hz transmission line on honey bees (*Apis mellifera* L.): Hemolymph as a possible stress indicator », *Bioelectromagnetics*, vol. 5, n° 3, p. 305--314, 1984.
- [189] R. Goodman, D. Weisbrot, A. Uluc, et A. Henderson, « Transcription in *Drosophila melanogaster* salivary gland cells is altered following exposure to low-frequency electromagnetic fields: Analysis of chromosome 3R », *Bioelectromagnetics*, vol. 13, n° 2, p. 111-118, 1992, doi: 10.1002/bem.2250130205.
- [190] P. Migdał, A. Roman, A. Strachecka, A. Murawska, et P. Bieńkowski, « Changes of selected biochemical parameters of the honeybee under the influence of an electric field at 50 Hz and variable intensities », *Apidologie*, vol. 51, n° 6, p. 956-967, déc. 2020, doi: 10.1007/s13592-020-00774-1.
- [191] J. Maliszewska, P. Marciniak, H. Kletkiewicz, J. Wyszowska, A. Nowakowska, et J. Rogalska, « Electromagnetic field exposure (50~Hz) impairs response to noxious heat in American cockroach », *J. Comp. Physiol. A*, vol. 204, n° 6, p. 605--611, 2018.
- [192] D. Todorović *et al.*, « Estimation of changes in fitness components and antioxidant defense of *Drosophila subobscura* (Insecta, Diptera) after exposure to 2.4 T strong static magnetic field », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, n° 7, p. 5305-5314, avr. 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3910-8.

Korrigierte Version des Berichts nach der Korrektur vom 10.01.2023. Anpassung auf Seite 3, Zeile 14: 0 - 100 kHz statt 0 - 10 kHz, (0 - 100 kHz, 100 kHz - 6 GHz, 6 GHz - 300 GHz).

Anhänge

1) Detaillierte Tabellen über die Wirkung von NIS

Wirkungen von NIS je nach Exposition (Frequenzbereich) für verschiedene Bewertungskriterien. Die Richtung der Wirkung wird wie folgt angegeben: neg = negative Wirkung für Arthropoden. Pos = positive Wirkung für Arthropoden. Incl = Nicht schlüssige Studie. Die Spalte «Gesamtverlässlichkeit» entspricht dem Verlässlichkeitsgrad einer NIS-Wirkung auf die Sterblichkeit im jeweiligen Frequenzbereich.

Tabelle 14 Sterblichkeit

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Kholy 2012 [31]	Von Funkwellen bis zur Mobiltelefonie			<i>D. melanogaster</i>	Verringerung der Lebensfähigkeit	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	gering
Makarov 2014 [134]	ELF EMF			<i>D. melanogaster</i> eggs	Verkürzung der Lebensdauer	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Todorovic 2013 [24]	SMF	50 mT	gering	<i>Tenebrio</i>	Keine Auswirkungen auf die Larvenentwicklung	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Stanojevic 2005 [22]	50Hz	6mT in der Theorie (nicht gemessen)	gering	<i>Musca domestica</i>	Verlängerung der Lebensdauer	pos	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Kawasaki 2020 [25]	50 Hz	35 kV/m	hoch	<i>D. melanogaster</i>	Die Exposition gegenüber einem elektrischen Feld von 50 Hz unter nährstoffarmen Bedingungen verlängert die Lebensdauer von	incl	0 Hz - 100 kHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
					männlichen und weiblichen WT-Fliegen um ~18 %, nicht aber die von drei verschiedenen cry-Mutanten und cry-Stämmen RNAi.				
Bindokas 1988 [135]	60 Hz	7 kV/m high voltage line 765 kV, 60Hz above hypbes 100kV/m in dry & wet tunnels	hoch	<i>Apis mellifera</i>	Erhöhte Sterblichkeit	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Ramirez 1983 [26]	ELF EMF	4,5-mT	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Abnahme des Geleges, erhöhte Sterblichkeit im Stadium der Eier, Nymphen und adulten Fliegen	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Martin 1989 [23]	EMF			<i>Apis mellifica carnica</i>	Anstieg der Lebenserwartung	pos	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Sudaryadi 2020 [28]	4G	6 Stunden neben einem Telefon HSDPA 2100	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Überlebensrate	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	gering
Yanagawa 2014 [33]	2,45 GHz	50-300W	hoch	<i>Coptotermes formosanus</i>	Erhöhte Sterblichkeit, Konvulsionen	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Darney 2015 [29]	13,56MHz – 868 MHz	1-4 mV/m bei 13,56 MHz, 3,42-5 V/m bei 868 MHz	gering	<i>Apis mellifera</i>	Erhöhte Sterblichkeit	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Lee 2008 [30]	835 MHz	DAS 1.6 W/kg to DAS 4.0 W/kg	hoch	<i>Drosophila</i>	Verringerte Lebensfähigkeit bei SAR = 4,0 W/kg, keine Auswirkung im ANSI-Bereich	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Shckorbatov 2007 [32]	35 GHz	10e-5 to 10 e-2 W/cm ²	gering	<i>D Melanogaster</i>	Verringerung der Lebensfähigkeit und Zunahme der Mutationsfähigkeit	neg	6 GHz – 300 GHz	gering	
Shakina 2011 [20]	36,64 GHz	0,4 W/m ²	gering	<i>D Melanogaster</i>	Kleinere Eier, schlechtere Lebensfähigkeit, tödliche Mutationen	neg	6 GHz – 300 GHz	mittel	

Tabelle 15 Fortpflanzung

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Panagopoulos 2013 [136]	50 Hz ELF	0,1 mT - 2,1mT	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Abnahme der Fortpflanzung, keine Dosis-Wirkungs-Beziehung bei den getesteten Intensitäten	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	hoch
Kikuchi 1998 [137]	ELF	0.5 or 5 mT	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Auswirkungen auf Flug und Fortpflanzung	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Diebolt 1978 [41]	SMF	In der Theorie 0,3 kV/cm (nicht gemessen)	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Keine Auswirkungen auf die Mutation der Samenzellen	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Chae 2008 [138]	60 Hz	(0.2 mT)	gering	<i>Spodoptera litura</i>	Zunahme der Bewegungen bei Larven im dritten Stadium	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch	
Todorovic 2020 [139]	ELF MF	10 mT	hoch	<i>Blaptica dubia</i>	Abnahme der Körpermasse der Nymphen, Zunahme aller untersuchten Bewegungsparameter	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Valadez-Lira 2017 [40]	ELF-EMF	2.0mT	hoch	<i>Trichoplusia ni</i>	Signifikanter Anstieg der Anzahl apoptotischer Zellen und der zellulären Immunantwort, keine Auswirkung auf die Eiablage	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Stamenkovic-Radak 2001 [140]	SMF			<i>Drosophila melanogaster</i>	Keine Auswirkung auf die Larvenentwicklung	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Graham 2000 [141]	60 Hz	0, 1.5, 80 μ T	gering	<i>Drosophila</i>	in einem Feld mit 80 mT hat sich eine geringere Stabilität der Entwicklung gezeigt	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Michel 1999 [91]	ELF-EMF 50 Hz Co-Stress zusammen mit Temp 34 bis 27°C	100 μ T +/- 2%	gering	<i>Stämme, in denen das Reporter-gen lacZ von den Segmentierungs-genen engrailed (en), fushi tarazu (ftz) oder sloppy paired (slp) kontrolliert wird</i>	Co Stress (ELF-EMF + temp) hat häufiger Anomalien hervorgerufen als der thermische Stress allein. Der Co-Stress die Entwicklungszeit verlängert.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Ma 1993 [142]	ELF -EMF AC & DC	50 - 400 mG	gering	Droso Oregon-R	Verringerung der Überlebensrate der Embryonen	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Becker 1976 [143]	50 Hz	~0.4 A/m bei 10 cm dist); 0.001 A/m bei 150 cm dist	gering	<i>Heterotermes indicola</i> (Wasman), eine Rhinotermitid von Indien.	Verzögerung der Eiablage	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Ramirez 1983 [26]	ELF EMF	4,5-mT	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Rückgang des Geleges, erhöhte Sterblichkeit im Stadium der Eier, Nymphen und adulten Fliegen	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Sudaryadi 2020 [28]	4G	6 Stunden neben einem Telefon HSDPA 2100	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Überlebensrate und die Grösse der Fortpflanzungsorgane	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	hoch
Odemer 2019 [36]	900 MHz	DAS 0.59 W/kg, 0.005–5 V/m	gering	Bienen (Königinnen)	Verringerung der Schlupfrate, aber nicht des Paarungserfolgs. Höhere Sterblichkeit der Königinnen in der EMF-Gruppe (HR 2,3)	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Geronikolou 2014 [144]	1880 MHz	SAR $5 \cdot 10^{-3}$ W/kg $7 \cdot 10^{-4}$ W/kg		<i>Drosophila melanogaster</i>	Geringe Zahl der gelegten Eier bei 900 Mhz	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Margaritis 2014 [145]	2,44 Ghz	0,3-22V/m	gering	<i>Drosophila melanogaster</i> und <i>Drosophila virili</i>	Erhöhte Apoptose der Eierstöcke	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Panagopoulos 2012 [38]	900 MHz	17.5 ± 3.2 V/m, 0.8 ± 0.2 mG	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verkleinerung der Eierstöcke. DNA-Schädigungen, die den Zelltod hervorrufen	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Chavdoula 2010 [37]	900-1800 Mhz	0.35 ± 0.07 mW/cm ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	verringert die Fertilität (Anzahl der Puppen). Verändert das Aktinskelett der Eikammer. DNA-Fragmentierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Panagopoulos 2010 [146]	900-1800 MHz	0.010 ± 0.002 mW/cm ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Die Fortpflanzungsrate nimmt linear mit der Expositionsdauer ab	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Sharma 2010 [59]	900 MHz	56.8 V/m	hoch	<i>Apis mellifera</i>	Abnahme der Kolonien-grösse und der Gelege Rate, kein Honig	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Panagopoulos 2010 [147]	900-1800 MHz	10 mW/cm ² , 0.6–0.7 V/m	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerte Fortpflanzungsrate infolge der Dosis und nicht der Frequenz, Zunahme des Zelltods in den Gonaden	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Panagopoulos 2007 [39]	900-1800 MHz	0.402 ± 0.054 mW/cm ² bei 900 MHz, 0.288 ± 0.038 mW/cm ² bei 1800 MHz	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Eiablage infolge der DNA-Schädigung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Panagopoulos 2007 [96]	900-1800 MHz	0,407 ± 0,061mW/cm ² bei 900MHz, 0.283 ± 0.043mW/cm ² bei 1,8GHz	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerte Fortpflanzungsrate infolge der Dosis und nicht der Frequenz	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Panagopoulos 2004 [148]	900-MHz	0.041 +/- 0.006mW/cm ² et 16.68+/-3.68V/m	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Fortpflanzungsrate	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Weisbrot 2003 [35]	(900/1,900 MHz)	20-63 V/m	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Höhere Zahl an Nachkommen, Anstieg der Hsp70-Werte, erhöhte DNA-Bindung des Serum Response Elements (SRE) und Induktion der Phosphorylierung des nuklearen Transkriptionsfaktors ELK-1.	pos	100 kHz – 6 GHz	gering	
Sagioglou 2014 [149]	100, 395, 682, 900MHz	NA	NA	<i>Drosophila</i>	Zunahme des apoptotischen Zelltods in der Eikammer	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Vilic 2017 [150]	(900 MHz)	f 10, 23, 41 & 120 V m ⁻¹ for 2 h	hoch	honey bee Larven	DNA-Schädigungen bei Larven von Honigbienen haben signifikant zugenommen	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Vijver 2013 [151]	900MHz	f 10, 23, 41 & 120 V m ⁻¹ for 2 h	hoch	<i>Folsomia candida</i> , <i>Orius laevigatus</i> , <i>Asobara japonica</i> , <i>Drosophila melanogaster</i>	keine Auswirkungen auf Fertilität und Nachkommenschaft	incl	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Lee 2008 [30]	835 MHz	DAS 1.6 W/kg bis DAS 4.0 W/kg	hoch	<i>Drosophila</i>	Aktivierung der MAPK-Signalgebung, verringerte Lebensfähigkeit bei einem SAR von 4,0 W/kg, keine Wirkung im ANSI-Bereich.	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Atli 2006 [152]	10 GHz	0.0156 Watt/m ² / 3.42 V/m	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Die mittlere Verpuppungszeit steigt mit der Expositionszeit an	neg	6 GHz – 300 GHz	gering	gering
Sheiman 2003 [34]	36 GHz	100 µW/cm ²	gering	<i>Tenebrio molitor</i>	Eine schwache elektromagnetische Strahlung stimulierte die Häutung und Verpuppung der Larven sowie die Metamorphose der Nymphen	pos	6 GHz – 300 GHz	gering	
Atli 2007 [153]	10 GHz	156 mV/m ² = 0,0156 Watt/m ² , die Intensität des elektrischen Feldes betrug 3,42 V/m und die SAR (spezifische Absorptionsrate) lag bei rund 9,8 mW/kg (11, 12, 13) 1 m Abstand zur Hornantenne	gering	Droso Oregon wt	Verringerung der Fruchtbarkeit Max. Wirkung: Rückgang um 27 %	neg	6 GHz – 300 GHz	gering	
Shakina (2011) [20]	36.64 GHz	0,4 W/m ²	gering	<i>D Melanogaster</i>	Kleinere Eier, schlechtere Lebensfähigkeit, tödliche Mutationen	neg	6 GHz – 300 GHz	mittel	

Tabelle 16 DNA-Schädigung

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Diebolt 1978 [41]	SMF	In der Theorie 0,3 kV/cm (nicht gemessen)	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Keine Auswirkungen auf die Mutation der Samenzellen	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	mittel
Pandir 2014 [154]	50 Hz	1.4-T	hoch	<i>Ephestia kuehniella</i>	Schädigung der DNA	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Kale 1982 [44]	SMF	13 000 Gauss	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Keine erkennbare Wirkung in Form einer DNA-Schädigung	incl	0 Hz - 100 kHz	gering	
Valadez-Lira 2017 [40]	ELF-EMF	2.0mT	hoch	<i>Trichoplusia ni</i>	Signifikanter Anstieg der Anzahl apoptotischer Zellen und der zellulären Immunantwort, keine Auswirkung auf die Eiablage	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Tegenkamp 1969 [155]	GMF	GMF-Ebene	gering	<i>Drosophila</i>	Mutationen	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Yanagawa 2020 [156]	2.45 Ghz	10 μ W/cm ² –100 mW/cm ²	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Nicht thermische Wirkung: Genotoxizität und Verhaltensänderungen	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	hoch
Panagopoulos 2012 [38]	900 MHz	17.5 \pm 3.2 V/m, 0.8 \pm 0.2 mG	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verkleinerung der Eierstöcke. DNA-Schädigungen, die den Zelltod hervorrufen	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Chavdoula 2010 [37]	900-1800 MHz	0.35 ± 0.07 mW/cm ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Fertilität (Zahl der Puppen). Verändert das Aktinskelett der Eikammer. DNA-Fragmentierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Panagopoulos 2007 [39]	900-1800 MHz	0.402 ± 0.054 mW/cm ² bei 900 MHz, 0.288 ± 0.038 mW/cm ² bei 1800 MHz	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Eiablage infolge der DNA-Schädigung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Hamnerius 1985 [42]	27 MHz bis 3.10-GHz	SAR 60–130 W/kg bei MW, bis zu 20 W/kg bei RF	hoch	<i>Drosophila</i>	Keine Auswirkungen auf Mutagenese	incl	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Hamnerius 1979 [43]	2450 MHz CW	SAR 100 W/kg	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	keine Auswirkungen auf Mutagenese	incl	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Vilic 2017 [150]	(900 MHz)	f 10, 23, 41 & 120 V m ⁻¹ for 2 h	hoch	Bienenlarven	DNA-Schädigungen bei Larven von Honigbienen haben signifikant zugenommen.	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Mittler 1977 [157]	98.5 MHz Radio EMF	0.3 V/m	gering	<i>Drosophila</i>	letal in den Chromosomen	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Panagopoulos 2019 [158]	[GSM 900, GSM 1800, 1 G MF, (MF1), 11 G MF (MF2), 21 G MF	0.378± 0.059mW/cm ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	DNA-Brüche SS DS (TUNEL-Test)	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
	(MF3), and 400 kV/m PEF								
Dyka 2016 [159]	36.6 GHz	25 mT , 1 W/m ² for 30s	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Erhöhter Polytäniegrad der Chromosomen.	neg	6 GHz – 300 GHz	gering	gering
Shckorbatov 2007 [32]	35 GHz	10e-5 to 10 e-2 W/cm ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Verringerung der Lebensfähigkeit und Zunahme der Mutationsfähigkeit	neg	6 GHz – 300 GHz	gering	
Shakina 2011 [20]	36.64 GHz	0,4 W/m ²	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Kleinere Eier, schlechtere Lebensfähigkeit, tödliche Mutationen	neg	6 GHz – 300 GHz	mittel	

Tabelle 17 Verhalten

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz,	1, 4 & 7 mT	hoch	<i>Schistocerca gregaria</i>	Verringerung der Fortbewegung, Anstieg von Hsp70	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	hoch
Kholy [31]	Von Funkwellen bis zur Mobiltelefonie			<i>Drosophila melanogaster</i>	Gedächtnisverlust, verringerte Lebensfähigkeit	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Jackson 2011 [109]	SMF			<i>Periplaneta americana</i>	Meidet das elektrische Feld. Bewegt sich weniger.	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Todorovic 2015[160]	50Hz	2mT	gering	<i>Morimus funereus</i>	Auswirkungen auf die neuronale Aktivität	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Chae 2008 [138]	60 Hz	(0.2 mT)	gering	<i>Spodoptera litura</i>	Zunahme der Bewegungen bei Larven im dritten Stadium	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch	
Vacha 2008 [161]	SMF	horizontale magnetische Flussdichte: 19,4±0,2 µT, vertikale Komponente: 39,8±0,2 µT, Gesamtvektor 44,3±0,2 µT, Neigung 64°±1°	gering	<i>Tenebrio</i>	Änderung der Fortbewegungsrichtung bei Umkehrung des SMF	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Kisliuk 1979 [162]	GMF	NA	NA	<i>Vespa orientalis</i>	Das fehlende GMF hindert die Hornissen daran, Waben zu bilden.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Shepherd 2018 [163]	50 Hz	1000–7000 μ T	gering	<i>Apis mellifera</i>	Auswirkung auf die kognitiven und motorischen Fähigkeiten	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch	
Shepherd 2019 [164]	ELF	100 μ T & 1000 μ T	gering	<i>Apis mellifera</i>	Senkt die Lernfähigkeit, erhöht die Aggressivität	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Kisliuk 1977 [165]	GMF	23.3 Oe 1.3 Oe (einheitlich); 0.3-0.6 Oe (uneinheitlich)	gering	<i>Vespa orientalis</i>	Der Nestbau war in den drei Konfigurationen unterschiedlich und die Larven haben nicht überlebt.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Perumpral 1978 [166]	Electro Static Field (ESF)	200-1500 V/cm		<i>Musca domestica</i> , <i>Trichoplusia ni</i>	Bei 750 v/cm zogen ein paar, aber signifikant mehr Fliegen das elektrostatische Feld vor.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Edwards 1960 [167]	ESF	10 - 62.5 V/cm		<i>Droso</i> , <i>Calliphora</i> adults	Bewegungsaktivität	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Stout 1992 [168]	unbestimmtes ELF	4 -150 a	NA	<i>Ophiogomphus colubrinus</i>	Keine Auswirkung auf die Bewegung	incl	0 Hz - 100 kHz	gering	
Greenberg 1972 [169]	45 - 75 Hz	0-500 mV/m	gering	Springschwänze & 3 Gruppen von Motten	Keine Auswirkung auf den «sanguine effect»	incl	0 Hz - 100 kHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Leucht 1984 [170]	EMF	2 Gauss	gering	<i>Apis mellifica</i>	Verlust der Phototaxis	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	Mittel
Martin 1989 [23]	EMF			<i>Apis mellifica carnica</i>	Verringerung der Flugfähigkeit, Anstieg der Lebenserwartung, Verlangsamung des Tanztempos	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Yanagawa 2020 [156]	2.45 Ghz	10 μ W/cm ² –100 mW/cm ²	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Nicht thermische Wirkung: Genotoxizität und Verhaltensänderungen	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Poh 2017 [50]	0.01-20 GHz			<i>Aedes Aegypti</i>	Nicht schlüssig	incl	100 kHz – 6 GHz	gering	
Yanagawa 2014 [33]	2,45 GHz	50-300W	hoch	<i>Coptotermes formosanus</i>	Erhöhte Sterblichkeit, Konvulsionen	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Cammaerts 2013 [57]	900MHz	0,77 V/m	gering	<i>Myrmica sabuleti</i>	Desorientierung. Unfähigkeit, nach dem Fund einer Futterquelle Hause zurückzukehren	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Ved-Parkash-Sharma 2010 [59]	Mobiltelefon			<i>Apis mellifera</i>	Abnahme der Kolonienstärke und der Gelegerate, kein Honig	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Ondracek [46]	2.375 MHz	0-40Wcm ²	hoch	<i>Caryedon gonagra,</i>	Die Insekten meiden intensiv beleuchtete Bereiche, wahrscheinlich	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
				<i>Pyrrhocoris apterus</i>	wegen der Erwärmung, Grenzwert bei 13,2 W/m ² .				
Vargova 2018 [48]	t 900 & 5000 MHz	0.493 nW/m to 1,05 mW/m ²	gering	<i>Dermacentor reticulatus</i>	Die Exposition gegenüber 900 MHz hat zu einer erhöhten Zeckenkonzentration geführt	neutr	100 kHz – 6 GHz	gering	
Cammaerts 2014 [69]	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	gering	<i>Myrmica sabuleti</i>	Verringerung der Bewegung und Orientierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Cammaerts 2012 [171]	900MHz	In der Theorie 7,95 und 10 24 W/m ²	hoch	Ameise	Auswirkung auf visuelles Gedächtnis und Geruchssinn	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Favre 2011 [172]	900 MHz zwei kommunizierende Mobiltelefone oben im Bienestock	SAR < 2 W/kg	gering	<i>Apis mellifera</i>	Durch Exposition gegenüber NIS induziertes Pfeifen (mit einem separaten Audio-Aufnahmegerät aufgezeichnet).	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Gary 1981 [173]	2.45 GHz	3 - 50 W/cm ²	hoch	<i>Apis mellifera</i>	Fähigkeit, nach Hause zurückzukehren	neg	100 kHz – 6 GHz	hoch	
Fratzak 2020 [47]	900MHz	0.6 V/m	gering	<i>Ixodes ricinus</i>	Von Strahlung angezogene Zecken	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	
Poh 2017 [50]	0.01-20 GHz			<i>Aedes Aegypti</i>	Nicht schlüssig	incl	6 GHz – 300 GHz	gering	gering

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Liddle 1986 [51]	9.6 GHz puls	10, 1, & 0,1 mW/cm ² = geschätzte SAR 40, 4 und 0,4 mW/g	hoch	Spinnen (<i>Araneus diadematus</i>)	Keine Auswirkung auf den Bau des Netzes in der Nacht bei höchster Dosis	incl	6 GHz – 300 GHz	gering	

Tabelle 18 Flugfähigkeit

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Kikuchi 1998 [137]	ELF	0.5 or 5 mT	hoch	<i>Drosophila melanogaster</i>	Auswirkungen auf Flug und Fortpflanzung	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	hoch
Wan 2016 [174]	GMF	25-52000 nT	gering	Wandernde Reiszikaden	Rückgang von Flug und Phototaxis	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Orlov 1990 [175]	RF EMF SMF?	8-10 kV/m	hoch	Insekten	Verändert den Flug der Stechmücken	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Martin 1989 [23]	EMF			<i>Apis mellifica carnica</i>	Verringerung der Flugfähigkeit, Anstieg der Lebenserwartung, Verlangsamung des Tanztempos	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Shepherd 2021 [54]	50 Hz	0; 100; 700; 1,000; und 7,000µT	hoch	<i>Schistocerca gregaria</i>	Verändert die Flügelschlagfrequenz	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	

Tabelle 19 Orientierung

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Ferrari 2014 [64]	GMF	0-1000nT	gering	Biene	Orientierung	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	Mittel
Wan 2019 [63]	GMF	GMF50µT vs. GMF45µT	gering	<i>Nilaparvata lugens</i>	im Norden und im Süden in der erwarteten Weise entlang der Wanderroute. Auch bei der Expression des cry1-Gens (Cryptochrom 1) vom Drosophila-Typ, das mit der Phototaxis verknüpft ist, und bei den Werten der beiden während des Fluges genutzten primären Energiesubstrate, Triglycerid und Trehalose, wurden konsistente magnetische Reaktionen festgestellt.	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Acosta-Avalos 2015 [66]	60 Hz	10, 16, 26 & 29 µT	gering	Feuerameise	Wirkung auf die Orientierung	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Wehner 1970 [65]	GMF			<i>Drosophila</i>	Orientierung	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Srygley 2006 [67]	SMF	0.75 T	hoch	<i>Pieridae</i>	Nachweis der magnetischen Orientierung	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Schiff 1991 [68]	0.01-100 kHz	09-30 μ T	gering	<i>Apis mellifica</i>	Beeinträchtigt den Magnetsinn	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Leucht 1984 [170]	EMF	2 Gauss	gering	<i>Apis mellifica</i>	Verlust der Phototaxis	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Cammaerts 2013 [57]	900MHz	0,77 V/m	gering	<i>Myrmica sabuleti</i>	Desorientierung. Unfähigkeit, nach dem Fund einer Futterquelle Hause zurückzukehren	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	mittel
Wiegmann 2020 [62]	144.06–151.98 MHz			<i>Paraphrynus laevifrons</i>	Keine Wirkung	incl	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Cammaerts 2014 [69]	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	gering	<i>Myrmica sabuleti</i>	Verringerung der Bewegung und Orientierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Tomanova 2016 [176]	1MHz	20 nT	gering	<i>Gondogeneia antarctica</i>	Verlust der Orientierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

Tabelle 20 Körperfunktionen und Stoffwechsel

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Eskov 2006 [177]	ELF	50 kV/m	hoch	Insekten	Wirkung auf Herz und trichoide Sensillen	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	hoch
Jankowska 2015 [71]	50 Hz	0.7 mT	gering	Skorpion	Veränderte Wirksamkeit der Toxine auf Schaben	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Spasic 2015 [178]	0-50 Hz	2mT	gering	<i>Morimus funereus</i>	Keine Auswirkung auf die Neuronenaktivität der Population	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Ilijin 2011 [179]	SMF und ELF MF	2mT in der Theorie	gering	<i>Lymantria dispar</i> L. neurones de chenilles	Morphometrische Veränderungen (Grösse der Neuronen und ihrer Kerne) der neurosekretorischen Dorsomedial- (A1') und Dorsolateral-Neuronen (L2') des Protocerebrums. Neurosekretorische L2' SMF: Eine Vergrösserung der A1'-Neuronen und ihrer Kerne wurde beobachtet Nach akuter SMF-Exposition. ELF MF: Eine Verkleinerung der Neuronen und ihrer Kerne wurde nach einer	neg	0 Hz - 100 kHz	sehr gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
					Exposition gegenüber ELF MF beobachtet.				
Ilijin 2011 [180]	Niederfrequente Magnetfelder			<i>L. dispa</i>	Intensive Synthese des insulinähnlichen neurosekretorischen Materials.	neg	0 Hz - 100 kHz	sehr gering	
Luo 2018 [70]	SMF	2 oder 4-kV/cm	hoch	<i>Sitobion Avenae</i>	Verringerung der Stoffwechselrate	pos	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Martel 1982 [72]	SMF	0.8 (CTRL) 5, 50 500 Gauss	gering	<i>Isopoda Porcellio laevis</i>	Der O ₂ -Verbrauch ist bei stärkerem SMF geringer.	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Kefuss 1999 [73]	SMF	7 Tesla	hoch	bee worker <i>Apis mellifera</i>	Hämolymphe: verringerte Trehalaseaktivität, Glukose unverändert; erhöhte Phospholipidwerte im Darm.	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Greenberg 1972 [169]	45 - 75 Hz	0-500 mV/m	Gering	Springschwänze & 3 Gruppen von Motten	Keine Auswirkung auf den «sanguine effect»	incl	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Manta 2017 [181]	Handelsübliches Mobiltelefon	f 0.15 W/kg	Gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Auswirkung auf die Genexpression und erhöhte Apoptose	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	gering

Tabelle 21 Fortbewegungsgeschwindigkeit

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Wyszkowska 2018 [182]	50 Hz	7 mT	hoch	<i>Periplaneta americana</i>	Erhöhte motorische Aktivität	pos	0 Hz - 100 kHz	gering	mittel
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz	1, 4 & 7 mT	hoch	Desert locust	Verringerung der Fortbewegung, Anstieg von Hsp70	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Jackson 2011 [109]	SMF			<i>Periplaneta americana</i>	Meidet das elektrische Feld. Bewegt sich weniger.	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Prolic 2003 [183]	50 Hz	2 mT	gering	<i>Morimus funereus</i>	Verringerung der motorischen Aktivität	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Shepherd 2018 [163]	50 Hz	1000–7000 μ T	gering	<i>Apis mellifera</i>	Auswirkung auf die kognitiven und motorischen Fähigkeiten	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch	
Todorovic 2020 [139]	ELF MF	10 mT	hoch	<i>Blaptica dubia</i>	Abnahme der Körpermasse der Nymphen, Zunahme aller untersuchten Bewegungsparameter	pos	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Zmejkoski 2017[184]	50 Hz	0.5 mT	gering	<i>Drosophila subobscura</i>	Verringerung der motorischen Aktivität. Diese Wirkung hielt bei Weibchen länger an als bei Männchen.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Dimitrijevic 2014 [185]	50 Hz	0.5 mT	gering	<i>Drosophila subobscura</i>	Verringerung der motorischen Aktivität der adulten Fliegen	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Prolic 1995 [186]	50 Hz	2 mT	gering	<i>Morimus funereus</i> (<i>Coleoptera</i> , <i>Cerambycidae</i>)	Keine signifikante Wirkung auf die Fortbewegung, aber tendenzielle Verringerung	incl	0 Hz - 100 kHz	gering	
Martin 1989 [23]	EMF			<i>Apis mellifica carnica</i>	Verringerung der Flugaktivität, Anstieg der Lebenserwartung, Verlangsamung des Tanztempos	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Vacha 2009 [88]	1.2 MHz - 7MHz	12-44nT	gering	American cockroach	Verringerte Bewegung bei 12,2 Mhz und 2,4 Mhz, jedoch nicht bei 7 Mhz	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	mittel
Cammaerts 2014 [69]	925 MHz–960 MHz	1.5V/m, 0.5V/m	gering	<i>Myrmica sabuleti</i>	Verringerung der Bewegung und Orientierung	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	
Seada 2016 [187]	900 MHz	0.70 W kg	gering	<i>Drosophila melanogaster</i>	Signifikante Verringerung der Fortbewegungsgeschwindigkeit	incl	100 kHz – 6 GHz	gering	

Tabelle 22 Stressbiomarker

Quellenangabe	NIS-Bereich	Dosis	Exposition	Organismus	Wirkung	Richtung	Erweiterter Bereich	Verlässlichkeit pro Studie	Verlässlichkeit pro Bereich
Wyszkowska 2016 [49]	50 Hz	1, 4 & 7 mT	hoch	<i>Schistocerca gregaria</i>	Verringerung der Fortbewegung, Anstieg von Hsp70	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	Mittel
Zhang 2016 [90]	50 Hz	3 mT	gering	<i>D melanogaster</i>	Erhöhte Reaktion auf Thermoschock (Hsp)	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Bindokas 1984 [188]	60 Hz	765kV Hochspannungsleitungen. 55, 80, 95 μ A	hoch	Bees	Proteinprofil der Hämocyten und der Hämolymphe als Stressindikator	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	
Michel 1999 [91]	ELF-EMF 50 Hz Co-Stress zusammen mit Temp 34 bis 27°C	100 μ T +/- 2%	gering	Droso-3-Stämme, in denen das Reportergen lacZ von den Segmentierungsgenen engrailed (en), fushi tarazu (ftz) oder sloppy paired (slp) kontrolliert wird.	Co-Stress (ELF-EMF + Temp) hat häufiger Anomalien hervorgerufen als thermischer Stress allein. Der Co-Stress hat die Entwicklungszeit verlängert.	neg	0 Hz - 100 kHz	gering	

Goodman 1992 [189]	1.5 bis 70 Hz 5 versch. Arten von ELF EM			<i>Drosophila</i>	Durch ELF EM-Felder induzierte Veränderungen in den Translationsmustern in exponierten Zellen (Chromosomen-Puffs bei definierten loci und Anstieg des Hsp70-Proteins etc.)	neg	0 Hz - 100 kHz	gering
Lupi 2020 [92]	50Hz	0-1500 V/m	gering	Biene	Erhöhtes Vorkommen von Stressbiomarkern	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel
Migda 2020 [190]	50 Hz	5.0 kV/m, 11.5 kV/m, 23 kV/m, und 34.5 kV/m	hoch	Biene	Erhöhte Aktivität des antioxidativen Systems. Ab 23kV/m	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel
Maliszewska 2018 [191]	50 Hz			<i>Periplaneta americana</i>	Beeinträchtigt den oxidativen Zustand und das Wärmeempfinden	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch
Wan 2019 [63]	GMF	GMF50 μ T vs. GMF45 μ T	gering	<i>Nilaparvata lugens</i>	Alle drei Phänotypen in Bezug auf Morphologie und Verhalten reagierten auf einen kleinen Unterschied in der magnetischen Feldstärke zwischen den simulierten Standorten im Norden und im Süden in der erwarteten Weise entlang der Wanderroute. Auch bei der Expression des cry1-Gens (Cryptochrom 1) vom Drosophila-Typ, das	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel

					mit der Phototaxis verknüpft ist, und bei den Werten der beiden während des Fluges genutzten primären Energiesubstrate, Triglycerid und Trehalose, wurden konsistente magnetische Reaktionen festgestellt.				
Todorovic 2014 [192]	SMF	2.4 T	hoch	<i>Drosophila subobscura</i>	Auswirkung auf die Superoxiddismutase	neg	0 Hz - 100 kHz	hoch	
Todorovic 2012 [89]		6 mT	gering	<i>Baculum extradentatum</i>	Moduliert die antioxidative Abwehr	neg	0 Hz - 100 kHz	mittel	
Lee 2008 [30]	835 MHz	SAR 1,6 W/kg bis SAR 4,0 W/kg	hoch	<i>Drosophila</i>	Aktivierung der MAPKS-Signalgebung, verringerte Lebensfähigkeit bei einem SAR von 4,0 W/kg, keine Wirkung im ANSI-Bereich.	neg	100 kHz – 6 GHz	gering	gering
Lupi 2021 [117]	100 kHz - 2.5Ghz	rund 1 µT	hoch	Biene	Synergistische Wirkung mit Pestiziden auf das erhöhte Vorkommen von Stressbiomarkern (ACE, CAT, GST)	neg	100 kHz – 6 GHz	mittel	

2) Raster zur Bewertung der Studienqualität

Bereich	Kriterien	Basis-Score der Anzahl der mit «Ja» beantworteten Fragen
Exposition/Dosis	Wurden die Expositionsbedingungen klar definiert?	Gering < 3 <= Mittel < 7 <= Hoch
	Wurden potenzielle Sekundärwirkungen berücksichtigt?	
	Wurde die Intensität der Exposition gemessen?	
	Wurde die Dosis-Wirkungs-Beziehung getestet?	
	Gibt es genügend Informationen, um die Studie zu reproduzieren?	
	Sind die Expositionsmessungen anerkannt?	
	Gab es keine Fehler während der Expositionsmessungen?	
	Gibt es signifikante Abweichungen zwischen den Expositionen?	
	Repräsentiert die Zahl der Stichproben die Population?	
Methoden	Ist das Protokoll aussagekräftig?	Gering < 2 <= Mittel < 3 <= Hoch
	Gibt es eine geeignete Kontrollgruppe?	
	Wurden Störfaktoren berücksichtigt?	
	Wurde die Hypothese klar formuliert und getestet?	
Statistik	Wurden geeignete statistische Methoden angewendet?	Gering < 2 <= Hoch
	War das Datenmanagement angepasst?	
	Wurden die Konfidenzintervalle angegeben?	

3) Gesetzliche Immissionsgrenzwerte für NIS, festgelegt durch die NISV und die ICNIRP

Nutzung	Frequenz	EF	MF	PFD (W/m ²)	PFD (μW/cm ²)	PFD (mW/cm ²)
Mobiltelefon	400 MHz	28 V/m	0,092 μT	2,08	207,96	0,21
	800 MHz	39 V/m	0,13 μT	4,03	403,45	0,40
	900 MHz	42 V/m	0,138 μT	4,68	467,90	0,47
	1800 MHz	58 V/m	0,195 μT	8,92	892,31	0,89
	2100 MHz	61 V/m	0,20 μT	9,87	987,00	0,99
	2600 MHz	61 V/m	0,20 μT	9,87	987,00	0,99
	2,600 - 300 GHz	61 V/m	0,20 μT	9,87	987,00	0,99
Stromleitungen	50 Hz	5 kV/m	100 μT	66313,00	6631299	6631,30
	16,7 Hz	10 kV/m	300 μT	265251,99	26525198,	26525,20

4) Bewertung der Qualität der ausgewählten Studien

Artikel	Exposition	Methode	Statistiken	Allgemeine Qualität
<i>Acosta-Avalos 2015</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Atli 2006</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Atli 2007</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Bartos 2019</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Becker 1976</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Bindokas 1984</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Bindokas 1988</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Bindokas 1989</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Cammaerts 2012</i>	Gering	Mittel	Gering	Gering
<i>Cammaerts 2013</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Cammaerts 2014</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Chae 2008</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Chavdoula 2010</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Darney 2016</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Diebolt 1978</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Dimitrijevi 2014</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Dyka 2016</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Edwards 1960</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Erdogah 2019</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Eskov 2006</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Favre 2011</i>	Gering	Hoch	Gering	Gering
<i>Fedele 2014</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Ferrari 2014</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Fratzak 2020</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Gaikwad 2016</i>	Mittel	Hoch	Gering	Gering
<i>Gary 1981</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Geronikolou 2014</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Goodman 1982</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Graham 2000</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Greenberg 1972</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Greenberg 1976</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Hamnerius 1979</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Hamnerius 1985</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Ilijin 2011 a</i>	Gering	Hoch	Gering	Gering
<i>Ilijin 2011 b</i>	Gering	Hoch	Gering	Gering
<i>Jackson 2011</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Jankowska 2015</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Kale 1982</i>	Gering	Gering	Hoch	Gering
<i>Kawasaki 2020</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Kefuss 1999</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Kermarrec 1981</i>	Gering	Gering	Gering	Gering

Artikel	Exposition	Methode	Statistiken	Allgemeine Qualität
<i>Kholy 2012</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Kikuchi 1998</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Kisliuk 1977</i>	Gering	Mittel	Gering	Gering
<i>Kisliuk 1979</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Lajzaro 2016</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Lee 2008</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Leucht 1984</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Liddle 1986</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Lopatina 2019</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Luo 2018</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Lupi 2020</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Lupi 2021</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Ma 1993</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Makarov 2014</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Maliszewska 2018</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Manta 2017</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Margaritis 2014</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Martel 1982</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Martin 1989</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Michel 1999</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Migda 2020</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Mittler 1977</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Odemer 2019</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Olsen 1982</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Ondracek 1976</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Orlov 1990</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Panagopoulos 2004</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Panagopoulos 2007</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Panagopoulos 2007</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Panagopoulos 2010 a</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Panagopoulos 2010 b</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Panagopoulos 2012</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Panagopoulos 2013</i>	Mittel	Hoch	Gering	Gering
<i>Panagopoulos 2019</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Pandir 2014</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Pereira 2019</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Perumpral 1978</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Poh 2017</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Prolic 1995</i>	Gering	Gering	Hoch	Gering
<i>Prolic 2003</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Ramirez 1983</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Rosi 2019</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Sagioglou 2014</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering

Artikel	Exposition	Methode	Statistiken	Allgemeine Qualität
<i>Schiff 1991</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Seada 2016</i>	Gering	Gering	Hoch	Gering
<i>Shakina 2011</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Sharma 2010</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Shckorbatov 2007</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Sheiman 2003</i>	Gering	Gering	Gering	Gering
<i>Sheiman 2009</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Shepherd 2018</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Shepherd 2019</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Shepherd 2021</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Shuai 2014</i>	Gering	Mittel	Gering	Gering
<i>Spasic 2015</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Srygley 2006</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Stanojevic 2005</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Starick 2005</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Stout 1992</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Stout 1995</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Sudaryadi 2020</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Tegenkamp 1969</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Todorovic 2011</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Todorovic 2012</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Todorovic 2014</i>	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<i>Todorovic 2015</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Todorovic 2020</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Tomanova 2016</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Vacha 2008</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Vacha 2009</i>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel
<i>Valadez-Lira 2017</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Vargovà 2018</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Vijver 2013</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Vilic 2017</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Wan 2016</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Wan 2019</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Watson 1997</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Wehner 1970</i>	Gering	Mittel	Hoch	Gering
<i>Weisbrot 2003</i>	Gering	Hoch	Gering	Gering
<i>Wiegmann 2020</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Wyszkowska 2016</i>	Hoch	Hoch	Gering	Gering
<i>Wyszkowska 2018</i>	Mittel	Gering	Gering	Gering
<i>Yanagawa 2014</i>	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
<i>Yanagawa 2020</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Zhang 2016</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering
<i>Zmejkoski 2017</i>	Gering	Hoch	Hoch	Gering