

Bio-elektromagnetische Interferenz

Die Insektenfühler als parasitäre Empfangsstrukturen - trägt der "Phantomvektor" zum Insektensterben bei?

Hypothesenpapier zur Grundlagenforschung

Themen: Bio-EMV · 5G-Technik · Hochfrequenz-Biologie · Insektensterben · Osmotropotaxis · Vorsorgeprinzip
Autor und Kontakt: Dipl.-Ing. (TU) Walter Sachs, walter@waltersachs.ch

STATUS

Dieser Beitrag formuliert eine wissenschaftliche Arbeitshypothese. Er präsentiert keine neuen Messdaten und keinen Kausalitätsnachweis. Die entwickelten Kopplungsmechanismen sind auf Basis gesicherter Physik plausibel - aber experimentell noch nicht an Insektenantennen getestet. Der Beitrag schlägt Möglichkeiten vor, diese zu schliessen.

In vorliegendem Beitrag werden drei Ebenen unterschieden:

- Gesicherter Befund: Experimentell repliziert, ohne ernsthaften wissenschaftlichen Widerspruch.
- Starke Evidenz: Konsistente Beobachtungen in kontrollierten Studien, mit methodischen Einschränkungen oder fehlender Replikation.
- Arbeitshypothese: Physikalisch plausible Mechanismen ohne direkten experimentellen Test am untersuchten System.

Abstract. Der globale Rückgang der Insektenpopulationen ist ein gesichertes ökologisches Phänomen und wird mehrheitlich auf Pestizide, Habitatverlust und Klimawandel zurückgeführt. Dieser Beitrag entwickelt eine elektrotechnische Ergänzungshypothese: Moduliertes Hochfrequenz-EMF (HF-EMF) im Bereich 700 MHz bis 3,5 GHz könnte über kapazitive und dielektrische Mechanismen in die Antennen-Sensillen von Insekten einkoppeln und deren pheromone Partnerfindung auf mehreren Wegen beeinflussen. Das Resultat wäre kein direktes Sterben, sondern Reproduktionsversagen - ein demographisch stiller Kollaps, der durch generationellen Zeitverzug (Extinction Debt) erst mehrere Generationen nach Expositionsbeginn in Bestandsdaten sichtbar wäre.

Vier Kopplungsmechanismen von EMF zu den Insektenfühlern (im folgenden "Antennen") werden formal entwickelt, ihre physikalische Plausibilität bewertet und ihre empirische Prüfbarkeit benannt.

Die verfügbare Evidenz aus systematischen Reviews zeigt in diese Richtung, aber ist methodisch noch nicht abgesichert, um Kausalität zu belegen. Auf Grundlage des wissenschaftlichen Vorsorgeprinzips wird ein konkretes Forschungsprogramm vorgeschlagen - sowie eine temporäre, geografisch begrenzte Massnahme diskutiert: die experimentelle Reduktion oder Abschaltung der Sendeleistung von Mobilfunkmasten während der dokumentierten Hauptpaarungszeiten ausgewählter Indikatorspezies als naturwissenschaftliches Feldexperiment.

1. Ausgangslage: Ein Insektenrückgang mit unvollständiger Ursachenerklärung

BEFUND

Gesichert: Der Rückgang von Insektenpopulationen in Mitteleuropa ist empirisch gut dokumentiert.

Hallmann et al. (2017) quantifizierten einen Rückgang der Biomasse fliegender Insekten in deutschen Naturschutzgebieten um 76 % über 27 Jahre. Dirzo et al. (2014) beschreiben einen globalen "Defaunierungstrend" bei Wirbellosen. Die vermuteten Haupttreiber - Pestizide, Habitatfragmentierung, Klimawandel - sind kausal gut belegt.

Die Erklärungslücke

Quantitative Modellierungen zeigen, dass diese drei Faktoren allein den beobachteten Rückgang nicht vollständig erklären, insbesondere nicht dessen räumliche Muster (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019). Das könnte ein Hinweis für einen zusätzlichen EMF-Effekt sein - eine im Moment offene Frage, die durch weitere Forschung schnellstmöglich belegt oder widerlegt werden sollte. Dieser Frage will der folgende Beitrag nachgehen und versuchen, herauszufinden, ob es plausible elektrotechnisch-biologische Mechanismen geben könnte, die einen EMF-Effekt plausibel erscheinen lassen würden.

Der Begriff "Insektensterben" suggeriert ein direktes, akutes Ereignis - Vergiftung, Kollision, Verhungern. Die tatsächliche demographische Realität ist häufig subtiler und folgerichtiger: Populationen kollabieren nicht durch erhöhte Sterblichkeit allein, sondern durch Reproduktionsversagen. Eine Generation, die keine oder weniger Nachkommen zeugt, ist demographisch äquivalent zu einer langsam aussterbenden Art - ohne dass ein einziges Individuum vorzeitig stirbt.

Die Mobilfunk-Infrastruktur hat sich seit den 1990er Jahren flächendeckend und zeitlich parallel zum Insektenrückgang in industrialisierten Ländern ausgebreitet. Allerdings ist zeitliche Korrelation alleine kein Kausalitätsbeweis. Das Fehlen einer plausiblen Erklärung wäre zumindest ein valides Argument gegen die Hypothese, dass das Insektensterben auch durch Reproduktionsversagen ausgelöst wird - allerdings gibt es eine plausible Erklärung. Diese ist physikalisch formulierbar, wie die folgenden Abschnitte zeigen.

Dieser Beitrag entwickelt die Hypothese, dass die menschlich gemachten Hochfrequenz-Felder (HF-EMF) des modernen Mobilfunks einen spezifischen, bisher unzureichend untersuchten Angriffspunkt auf die Reproduktionskette der Insekten darstellen: das Pheromon-Kommunikationssystem und die hochspezialisierte olfaktorische Antenne als sein primäres Interface. Die Argumentation ist elektrotechnisch, nicht biologisch. Sie stützt sich auf messbare physikalische Zusammenhänge und wird durch die bisher umfassendste systematische Review zu diesem Thema - die BEEFI-Studie (Thill, Cammaerts & Balmori, 2024) - empirisch gestützt.

2. Empirischer Rahmen: Was die Forschung bislang zeigt - und was nicht

2.1 Die BEEFI-Studie (Thill, Cammaerts & Balmori, 2024)

STATUS

Gesichert: Nicht-thermische EMF-Wirkungen auf Insekten sind im Labor klar belegt, die ökologischen Implikationen im Freifeld sind jedoch noch nicht vollständig bekannt. Die Studie ist methodisch nach PRISMA-Richtlinien durchgeführt und in

Scopus sowie Web of Science indexiert. Die Studie wird weiterhin durch den unabhängigen BAFU-Bericht (2022) und den European Parliament Research Service-Bericht (Thielens, 2021) inhaltlich gestützt.

Die bislang umfassendste systematische Review zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder auf Insekten analysierte mehr als hundert Studien zu kontinuierlichen und gepulsten Hochfrequenz- und Niederfrequenzfeldern (Thill, Cammaerts & Balmori, 2024). Die zentrale quantitative Aussage: Die grosse Mehrheit der Studien fand statistisch signifikante biologische Effekte bei Feldstärken weit unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte von 41-61 V/m, Effekte beginnen bereits ab 2 V/m. Die Studie nutzt den Toxizitätsschätzer (Ratio of Means), um Effekte auf Insekten zu quantifizieren. Speziell für die Reproduktionskapazität ergibt sich eine statistisch signifikante Reduktion von 18 % bei Feldstärken unter 2 V/m bis zu 31 % im Bereich von 2–7 V/m. Weiterhin werden olfaktorische Reaktionen explizit als Effektkategorie aufgeführt.

2.2 Unabhängige Stützung

- Der Bericht des Schweizer Bundesamts für Umwelt (Mulot et al., 2023) stellt eine systematische Forschungslücke zu HF-EMF-Effekten auf Gliederfüsser (Arthropoden) fest und legt Vorsorge nahe.
- Der Bericht des European Parliament Research Service (Thielens, 2021) bestätigt, dass die Absorption von HF-EMF in Insektenkörpern physikalisch modellierbar und nicht trivial ist.

3. Physikalische Grundlagen: Wie HF-Felder in die Insektenantenne koppeln könnten

STATUS

Arbeitshypothese: physikalisch konsistent, nicht experimentell bestätigt.

3.1 Die Insektenantenne als elektrotechnisches Interface

Die Partnerfindung bei den meisten Käfern, Fliegen und Mücken, basiert auf einer der empfindlichsten Sensorleistungen der Natur. Weibchen emittieren Pheromone ("riechbare Sexualhormone") in Konzentrationen von wenigen Molekülen pro Kubikzentimeter Luft. Die gefiederten oder fadenförmigen Antennen der Männchen fungieren als hochspezialisierte Detektoren, deren Erkennungsleistung jede menschliche Sensorik übertrifft.

Auf der Antennenoberfläche befinden sich Tausende von Sensillen, in denen olfaktorische (geruchsempfindliche) Rezeptorneuronen (ORNs) eingebettet sind. Wenn Pheromonmoleküle an Rezeptorproteine binden, löst dies eine Ionenkanal-Kaskade aus, die die chemische Information in elektrische Aktionspotenziale, also Spannungen umwandelt. Diese neuronalen Spannungssignale liegen im Niederfrequenzbereich und weisen Potenziale im Mikrovolt- bis Millivolt-Bereich auf - messbar als Elektroantennogramm (EAG) (Schneider, 1962; Kaissling, 2014). Membranwiderstände olfaktorischer Rezeptorneuronen (ORNs) liegen im Bereich 10^8 - $10^{10} \Omega$ - was sie zu hochohmigen, empfindlichen Spannungsdetektoren macht.

Eigentlich liegen die Insektenantennen mit Längen von typisch 5-30 mm weit unterhalb der Wellenlänge der im Mobilfunk verwendeten Frequenzen (Wellenlänge bei 3 GHz ist 100 mm). Allerdings ist die Insektenantenne elektrotechnisch gesehen eine Electrically Small Antenna (ESA) mit Verkürzungsfaktoren von 5-7 ($\sqrt{\epsilon_r}$) mit $\epsilon_r \approx 40$ -50, Thielens et al., 2018), wodurch die Antennenstrukturen bereits im unteren Gigahertz-Bereich (2-6 GHz) in resonante Zustände übergehen können.

Die induzierte Leerlaufspannung U_0 ergibt sich aus der Feldstärke E_{int} innerhalb des Gewebes und der Länge der Antenne. Unter Berücksichtigung der dielektrischen Grenzflächenbedingungen

reduziert sich die äussere Feldstärke E_0 im Medium näherungsweise um den Faktor der

Brechungsindex-Komponente: $U_0 = E_{\text{int}} \cdot l \approx \frac{E_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1}{2}$ Bei einer typischen Fernfeldimmission in

Wohngebieten (0.03-0.5 V/m, gemäss BAFU / SwissNIS, 2025) von $E_0 = 0.5$ V/m resultiert daraus für eine 20 mm lange Antenne eine theoretische Leerlaufspannung von $U_0 \approx 0.7$ mV.

Zusammen mit dem sehr hohen Membranwiderstand im Gigaohmbereich können schon kleine, feldinduzierte Verschiebungsströme infolge kapazitiver Kopplung an den hochohmigen ORN-Eingängen für das Insekt relevante Spannungen erzeugen.

Dies wird durch Thielens et al. (2018) modellbasiert bestätigt: Die absorbierte Leistung in Insektenkörpern steigt bereits ab dem GHz-Bereich signifikant an - nicht erst im mmWave-Band. Und die BEEFI-Studie ergänzt: Für höhere 5G-Frequenzen ab 10 GHz steigt die absorbierte Leistung nochmals um den Faktor bis zu 100 (Thill et al., 2024, unter Bezug auf Thielens und De Borre).

3.2 Energiebilanz: Warum ein Rezeptorkanal nicht ausreicht

Das thermische Johnson-Nyquist-Rauschen eines ORN bei $R = 1$ GΩ und $\Delta f = 1$ kHz beträgt:

$$U_n = \sqrt{(4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)} \approx 4 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

Obwohl die induzierte Spannung U_0 (ca. 700 μV) rein rechnerisch deutlich über dem Rauschteppich liegt, erscheint eine direkte Signalinterferenz im Fernfeld thermodynamisch fragwürdig. Aufgrund der extrem geringen Wirkfläche A einer ESA und der massiven Impedanzfehlانpassung zwischen dem freien Raum, dem verlustbehafteten Gewebe sowie der Ankopplung an den Nerv ist die verfügbare Leistung P_{av} der "Antenne" verschwindend gering. Die eingekoppelte Energie reicht vermutlich nicht aus, um die notwendige Ladungsmenge für eine stabile Konformationsänderung der Ionenkanal-Proteine gegen die thermische Energie $k_B T$ zu verschieben.

Effektive Störspannungen an einem einzelnen ORN sind deshalb sehr wahrscheinlich unterhalb dieser Rauschschwelle. Direkte Amplitudeninterferenz an einem einzelnen Rezeptorkanal im Fernfeld bei niedrigen Feldstärken erscheint thermodynamisch nicht plausibel. Dies führt direkt zur Frage: Unter welchen Bedingungen können systemische Effekte dennoch biologisch relevant sein?

4. Vier Arbeitshypothesen zur Interferenz mit der Pheromon-Kommunikation

STATUS

Alle vier Pfade sind Arbeitshypothesen ohne experimentelle Bestätigung am Zielsystem. Allen Pfaden gemeinsam ist, dass nicht die Trägerfrequenz das entscheidende Kriterium ist, sondern das aufmodulierte Nutzsignal - so entwickelten Wust et al. (2020) ein Membranmodell, nach dem die HF-Feldkomponente durch Nichtlinearität des Ionenkanals gleichgerichtet wird

Pfad A - Nahfeld-SNR-Verschlechterung und direkte Schäden

In der Nähe von Sendeanlagen können induzierte Spannungen die Johnson-Nyquist-Schwelle überschreiten. Direkte Amplitudeninterferenz in einzelnen ORNs wäre hier möglich, genauso wie permanente Schäden an den Insektenantennen durch thermische Effekte und induzierte Spannungen.

Pfad B - Ion Forced-Oscillation durch ELF-Modulationsstruktur

Panagopoulos et al. (2021) zeigen formal, dass polarisierte, kohärente HF-Felder mit ELF-

Modulation irreguläres Gating an spannungsgesteuerten Ionenkanälen (VGICs) erzeugen können. Entscheidend ist in diesem Falle nicht der GHz-Träger, sondern die Einhüllende des modulierten Signals. Diese wäre der biologisch relevante Stimulus.

Das pheromone olfaktorische Verarbeitungsband der meisten Insekten liegt bei 5-1000 Hz. GSM-Pulsrahmen liegen bei 217 Hz, LTE (4G)-Subframes bei 10-1000 Hz, 5G hat typischerweise zusätzlich 50 Hz (SSB-Synchronisationssignal). Eine spektrale Überlappung ist gegeben. Ob diese Überlappung biologisch relevant ist, ist experimentell nicht bekannt.

Pfad C - Ephaptische Kohärenzsummation

Zhang et al. (2019) liefern den direkten experimentellen Beweis, dass ephaptische Kopplung allein - ohne Synapsen - ausreicht, um laterale Inhibition zwischen ORNs desselben Sensillum zu treiben. Bokil et al. (2001) belegen dasselbe Prinzip im olfaktorischen Nerv von Säugetieren. Ein externes, kohärentes EM-Feld würde alle ORNs eines Sensillum gleichzeitig und phasengleich stimulieren. Bei N koppelnden ORNs skaliert das Störsignal mit N, das unkorrelierte thermische Rauschen nur mit $\sqrt{N}$ - was einem Signal-zu-Rausch-Gewinn zugunsten des Störsignals entspricht. Zusätzlich ist die ephaptische Inhibition asymmetrisch: physisch grössere ORNs dominieren die Kopplung, was eine differenzielle Verzerrung des Sensillum-Outputs erzeugt. Ob diese Kohärenzsummation bei realen Umgebungsfeldstärken biologisch relevant ist, ist bisher nicht erforscht - und wäre eine direkt testbare Hypothese.

Pfad D - Osmotropotaxis-Störung durch differenzielle Feldkopplung: Das Männchen fliegt in die falsche Richtung

Der gravierendste der hier entwickelten Mechanismen betrifft nicht das ob, sondern das wohin der Pheromondetektion. Er erfordert kein volles Jamming des olfaktorischen Signals - eine geringfügige, differenzielle Verzerrung des bilateralen Inputs reicht aus, um die Richtungsnavigation fehlzuleiten.

Insekten nutzen den minimalen Konzentrationsunterschied desselben Pheromons zwischen linker und rechter Antenne zur Richtungsbestimmung - bekannt als Osmotropotaxis. Takasaki et al. (2012) zeigten dies bei Seidenspinnern. Bei diesen bestimmt der Unterschied in Timing und Intensität des bilateralen Pheromoninputs direkt die initiale Laufrichtung. Bereits kleine Asymmetrien erzeugen klare, reproduzierbare Richtungsänderungen. Im Antennal-Lobe kodieren dritte Interneurone den Richtungsvektor über kontralaterale Inhibition - linke Antenne aktiviert, rechte Antenne hemmt, das Differential ergibt den Steuerbefehl (Mohamed et al., 2019).

Die induzierte Spannung in einer linearen Empfangsstruktur ist:

$$U_{\text{ind}} \sim E \cdot \cos(\theta)$$

wobei θ der Winkel zwischen der Polarisationssebene des einfallenden Feldes und der Längsachse der jeweiligen Antenne ist. Da die beiden Antennen eines Insekts in unterschiedliche Raumrichtungen zeigen (typisch 20-60° Spreizwinkel, je nach Art und Körperhaltung), ist θ für linke und rechte Antenne systematisch verschieden. Das resultierende Störsignal-Differential:

$$\Delta U = U_{\text{links}} - U_{\text{rechts}} = E \cdot [\cos(\theta_{\text{links}}) - \cos(\theta_{\text{rechts}})] \neq 0$$

ist von der Pheromonkonzentration vollständig unabhängig, aber vom HF-Feldwinkel und der Polarisierung determiniert. Das neuronale Differenzialnetzwerk (also das "Insektengehirn") interpretiert diese Differenzspannung ΔU als Richtungssignal. Das Insekt navigiert nicht zur Pheromonquelle, sondern in eine verschobene Richtung, basierend auf einem durch Jamming verursachten Phantomvektor.

Dieser Mechanismus ist besonders heimtückisch aus drei Gründen:

- Unsichtbares Fehlverhalten: Das Männchen verhält sich präzise und zielgerichtet - es fliegt

nur in die falsche Richtung.

- Systematischer, nicht stochastischer Fehler: Alle Männchen in einem gegebenen polarisierten HF-Feld werden gestört und bekommen falsche Richtungssignale eingespielt.
- Keine erhöhte Sterblichkeit: Die Männchen leben, suchen, navigieren - und finden das Weibchen trotzdem nicht.
- Niedrige Wirkungsschwelle: Der Mechanismus ist bereits wirksam, wenn ΔU die Auflösungsgrenze des bilateralen Komparators überschreitet - eine deutlich niedrigere Schwelle als das absolute Johnson-Nyquist-Limit.

Experimentelle Daten von Cammaerts, 2013, Feldbeobachtungen von Balmori, 2015 und Lázaro, 2016 zeigen eine konsistente Desorientierung von Insekten in EMF-Feldern. Mein Modell der bilateralen Asymmetrie-Einkopplung erklärt erstmals physikalisch den Mechanismus hinter diesen Beobachtungen: Die Desorientierung ist die Folge eines feldinduzierten Phantomvektors, der das neuronale Navigationssystem des Insekts systematisch fehllleitet.

5. 5G als qualitativ neue Expositionsdimension oder das perfekte olfaktorische Jamming

STATUS

Arbeitshypothese: physikalisch konsistent, nicht experimentell bestätigt.

Eine naheliegende Vermutung lautet, dass die in den letzten zehn Jahren exponentiell gestiegene Mobilfunknutzung auch zu exponentiell gestiegenen Feldstärken geführt hat. Die Messdaten widerlegen dies für die über sechs Minuten zeitlich gemittelten Breitband-Pegel in den meisten Fällen - und machen damit eine präzisere, elektrotechnische Betrachtung notwendig.

5.1 Stabiler Mittelwert, veränderte Feldstruktur: Der Schweizer Längsschnitt

Loizeau et al. (2023) verglichen an 49 identischen Messpunkten in der Schweiz die persönlichen HF-EMF-Expositionen der Jahre 2014 und 2021. Ergebnis: Die zeitlich gemittelten Breitband-Feldstärken haben sich trotz eines 18-fachen Anstiegs des mobilen Datenvolumens nicht signifikant verändert. Moderne Netzwerke sind effizienter: Sie senden mehr Daten mit ähnlicher mittlerer Strahlungsleistung.

Für die biologische Wirkungsbewertung ist dies jedoch kein Entlastungsargument, sondern ein Hinweis auf die falsche Messgröße. Zeitlich gemittelte Breitband-Feldstärke ist für die in diesem Beitrag entwickelten Mechanismen nicht die entscheidende physikalische Größe. Entscheidend sind: Kohärenz, Polarisierung, Pulsstruktur, Spitzenamplitude und räumliche Gerichtetheit - alles Eigenschaften, die sich von Generation zu Generation des Mobilfunks fundamental verändert haben, ohne im Breitband-Mittelwert aufzutauchen.

5.2 Massive MIMO und Beamforming: Der kohärenteste Feldvektor aller Mobilfunkgenerationen

5G-Mobilfunk unterscheidet sich durch massives MIMO und Beamforming fundamental von früheren Standards. Während Sektorantennen (GSM/LTE) großflächige, statische Ausleuchtungszone erzeugen, emittiert eine 5G-Basisstation hochgebündelte Strahlen ($3-10^\circ$), die zudem eine extrem hohe räumliche Kohärenz aufweisen. Für den Osmotropotaxis-Störmechanismus ist dies entscheidend: Das $\cos(\theta)$ -Differenzial zwischen den Insektenantennen reagiert empfindlich auf die Phasenfront-Geometrie. In einem dynamisch gesteuerten 5G-Beam erfährt das Insekt durch die scharfe Bündelung und die schnellen Beam-Wechsel fast sprunghafte Änderungen der induzierten Spannung ΔU . Hinzu kommt Beam Steering: 5G-Systeme lenken ihren Strahl dynamisch zu mobilen Nutzern um. Ein Insekt in der Versorgungsfläche erlebt damit

rasch wechselnde Feldrichtungen und Polarisationsachsen - sozusagen einen sich kontinuierlich ändernden Phantomrichtungsvektor: es ist keine statische Ablenkung in eine falsche Richtung mehr, sondern permanente Desorientierung ohne Konvergenz.

5.3 5G-Rahmenstruktur: Reichere ELF-Hüllkurve im biologisch kritischen Band

Ein zweiter, für die Systemanalyse wesentlicher Unterschied betrifft die zeitliche Struktur der Signalhüllkurve und deren Auswirkungen im Niederfrequenzspektrum. Die in 3GPP TS 38.211 definierte Rahmenarchitektur von 5G basiert auf einer strikt hierarchischen und zugleich flexiblen Zeitdiskretisierung (Radio Frame, Subframe, Slot, Mini-Slot). Diese Struktur erzeugt - in Verbindung mit burstartiger Übertragung und dynamischer Ressourcenzuweisung - eine ausgeprägt nichtstationäre Hüllkurve. Im Frequenzbereich führt dies zu diskreten niederfrequenten Spektralkomponenten, deren Lage unmittelbar mit den zugrunde liegenden Zeitperiodizitäten korreliert.

Für eine typische Numerologie ($\mu = 1$, 30 kHz Subcarrier-Abstand) ergeben sich deterministische Zeitskalen von 10 ms (100 Hz), 1 ms (1 kHz) und 0.5 ms (2 kHz). Zusätzlich treten weitere periodische Anteile durch überlagerte Protokoll- und Signalisierungsstrukturen auf, insbesondere durch Synchronisationssignalblöcke (SSB), deren Wiederholperioden im FR1-Bereich im Bereich mehrerer Millisekunden liegen (typisch 20 ms entsprechend 50 Hz). Im Unterschied zu klassischen kontinuierlichen Trägersignalen entstehen diese Komponenten jedoch primär durch diskontinuierliche, paketbasierte Aktivität und sind daher in Amplitude und spektraler Ausprägung zeitvariabel. Insbesondere sind es Frequenzen um die 50 Hz, die in zahlreichen ELF-Bioeffektstudien als besonders biologisch aktiv beschrieben werden. Das Verarbeitungsband insektischer olfaktorischer Neuronen wird damit von 5G dichter und vollständiger überlappt als von jedem Vorgängerstandard. Die BEEFI-Studie hält fest, dass Pulsmodulation bei Gehirnfrequenzen biologisch stärker wirkt als CW-Signale (Thill et al., 2024) - 5G maximiert genau diese Eigenschaft. Das reichhaltige ELF-Spektrum wirkt auf das Insekt wie ein ganzes "Störorchester", welches sich zudem dauernd im dreidimensionalen Raum bewegt, dies im Gegensatz z.B. zu 2G, wo die 217 Hz-Taktung einen einzelnen, räumlich stabilen Störton ergaben.

CDMA-basierte Systeme (3G) dagegen erzeugen aufgrund ihrer breitbandigen, quasi-stationären Spreizsignale eine vergleichsweise glatte Hüllkurve ohne ausgeprägte niederfrequente Linienstruktur. LTE (4G) führt mit seiner OFDM-basierten Rahmenstruktur zwar bereits diskrete Komponenten bei 100 Hz und 1 kHz ein, bleibt jedoch in seiner Zeitstruktur deutlich stabiler.

Folglich ist eine Übertragung von Analyse- oder Bewertungsansätzen aus 3G- oder 4G-Systemen direkt auf 5G nur eingeschränkt zulässig; insbesondere im Hinblick auf die zeitliche Hüllkurvenstruktur und deren spektrale Repräsentation im Niederfrequenzbereich erfordert 5G eine eigenständige, ergänzende Betrachtung.

typische 5G Rahmenstruktur und resultierende ELF-Komponenten: • Radio Frame: 10 ms (100 Hz) • Subframe: 1 ms (1.000 Hz) • SSB Burst Set Periode (FR1): 20 ms (50 Hz) • Slot-Grenze ($\mu=1$, 30 kHz SCS): 0,5 ms (2.000 Hz) • Vergleich GSM: 217 Hz (TDMA-Pulsrahmen) | LTE: 100 Hz + 1.000 Hz

5.4 OFDM-PAPR: Die Spitzenamplitude ist die biologisch relevante Grösse

5G mit Kanalbandbreiten bis 100 MHz (FR1) basiert auf CP-OFDM (Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing), einem Mehrträgerverfahren mit einem statistisch bedingten Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) von typisch 10-12 dB. Das bedeutet: Die instantane Spitzenfeldstärke übersteigt die zeitlich gemittelte Amplitude um mehr als den Faktor 10 (Dahlman et al., 2021; vgl. auch die CCDF-Statistik für gauss-verteilte OFDM-Signale: 10,3 dB bei 99,9 % der Symbole). Dies ist ein konstruktionsbedingtes Merkmal des OFDM-Modulationsverfahrens. Dies zeigen auch erste Feldmessungen: Aerts et al., 2019, messen unter aktiver 5G-Downlink-Last

Spitzenleistungsdichten bis zu 12-fach über dem Hintergrundniveau im Leerlauf.

In biologischen Systemen ist nicht der zeitliche Mittelwert, sondern die Spitzenamplitude des elektrischen Feldes die physikalisch relevante Störgrösse. Spannungsgesteuerte Ionenkanäle (VGICs) reagieren auf die instantane lokale Feldstärke an der Membran, nicht auf einen Zeitmittelwert, die Gating-Kinetik folgt einer Boltzmann-Statistik, bei der die Öffnungswahrscheinlichkeit nichtlinear - näherungsweise quadratisch oder stärker - mit der Feldamplitude skaliert (Weaver & Astumian, 1990). Kleine Zunahmen der Spitzenamplitude führen daher überproportional zu biologischen Wirkungen.

Das 5G-Trägersignal wird durch eine komplexe Signalstruktur moduliert. Diese ist gekennzeichnet durch Komponenten im Nieder- und Mittelfrequenzbereich (Hz bis kHz), also genau jene Frequenzbereiche, in denen Ionenkanäle und biologische Oszillatoren resonant ansprechen. Gepulste und amplitudenmodulierte HF-Felder sind nach vorliegender Evidenz signifikant bioaktiver als kontinuierliche, unmodulierte Felder gleicher mittlerer Intensität (Panagopoulos et al., 2025). Es sind diese aufmodulierten Niederfrequenzanteile - nicht das Trägersignal selbst - die nach dem IFO-VGIC-Modell (Ion Forced Oscillation - Voltage Gated Ion Channels) als biologisch wirksamer Stimulus fungieren.

Vor diesem Hintergrund unterschätzen zeitlich gemittelte Breitband-Feldstärkemessungen, wie sie für die Regulierung herangezogen werden, die biologische Relevanz von 5G-Signalen massiv und systematisch: Sie erfassen weder die OFDM-bedingten Spitzenfelder noch die Modulationsstruktur des Signals.

6. Demographischer Zeitverzug: Warum Nullbefunde in Kurzzeitstudien erwartbar sind

STATUS

Gesicherter populationsökologischer Befund.

Reproduktionsversagen hinterlässt in Bestandserhebungen eine charakteristische, zunächst unsichtbare Spur. Kuussaari et al. (2009) quantifizieren diesen Effekt unter dem Begriff "Extinction Debt": Nach einer Habitatverschlechterung persistiert die Abundanz der betroffenen Population oftmals für mehrere Generationen auf scheinbar stabilem Niveau - getragen von überlebenden Adulttieren, die sich nicht mehr oder weniger erfolgreich fortpflanzen. Die demographische Zeitverzögerung zwischen Ursachenbeginn und messbarem Populationsrückgang beträgt typischerweise mehrere Generationszeiten. Bei Insekten mit mehreren Generationen pro Jahr sind das Monate; bei Einjahres-Spezies mehrere Jahre.

Dieser Mechanismus erklärt, warum in Feldstudien die zeitliche Korrelation zwischen EMF-Infrastrukturausbau und messbarem Insektenrückgang oft schwach oder verzögert erscheint - was fälschlicherweise als Argument gegen einen Zusammenhang gewertet wird. Der Extinktionsschulden-Mechanismus erzeugt genau dieses Muster: stabiler Schein im Bestand, verzögerter demographischer Einbruch. Die BEEFI-Studie weist explizit darauf hin, dass Feldstudien um Basisstationen bei zu kurzer Expositionsdauer systematisch keine Effekte finden - was methodisch erwartet ist und keine inhaltliche Aussage erlaubt.

Daraus folgt: Kurzzeitstudien sind ein schlechtes Prüfdesign, zeigen sie doch keine Effekte bei reproduktionsgestörten (sei es durch EMF oder Noxen) Populationen.

7. Regulatorische Lücke: Die geltenden Grenzwerte adressieren das Problem nicht

STATUS

Gesicherter regulatorischer Befund.

Die ICNIRP-Richtlinien, 2020 für HF-EMF sind auf den Schutz des Menschen vor thermischen Wirkungen ausgelegt. Was sie konstruktionsbedingt nicht abdecken, benennt ICNIRP in einem eigenen Gap-Statement explizit: Während der Entwicklung der 2020er Richtlinien wurden Wissenslücken identifiziert - darunter nicht-thermische Wirkungen, Langzeiteffekte sowie Wirkungen auf andere Spezies als den Menschen (ICNIRP, 2025). Die ICNIRP-Richtlinien basieren auf dem Wissen darüber, wie HF-EMF den menschlichen Körper thermisch beeinflusst; es gibt derzeit keine anerkannten internationalen Richtlinien zum spezifischen Schutz von Tieren und Pflanzen. Ob die ICNIRP-Richtlinien für Menschen ausreichen, um die Umwelt zu schützen, ist Gegenstand aktiver Debatte. (Karipidis et al. (2023)).

Dies ist keine Kritik an den ICNIRP-Grenzwerten als solchen. Es ist die Feststellung einer regulatorischen Lücke: Ein ökologisches Bio-EMV-Schutzkonzept, das die frequenzselektive Empfindlichkeit pheromonsensitiver Systeme von Wirbellosen, differentielle Exposition durch kohärentes Beamforming und nicht-thermische Wirkungen auf Insektenneurosensorik berücksichtigt, existiert regulatorisch nicht - und ICNIRP selbst hält weitere Forschung in diesem Bereich für notwendig.

8. Forschungsprogramm: Was untersucht werden muss

1. Direkter Test von Pfad D (Osmotropotaxis): Dual-Kanal-EAG-Experimente unter winkelvariabler, polarisierter HF-Exposition verschiedener Mobilfunkstandards (GSM, LTE, 5G). Messgröße: ΔU zwischen linker und rechter Antenne als Funktion des Einfallswinkels θ und der Feldstärke.
2. Verhaltensexperimente zur Paarungssucherfolgsrate: Freiflug-Experimente in HF-geschirmten Kammern mit definierten Polarisationsfeldern. Kontrollbedingung: CW vs. moduliert, unterschiedliche Standards. Messgröße: Latenz bis Partnerfindung, Paarungsrate.
3. Spektralanalyse des EAG-Signals unter 5G-Exposition: Nachweis oder Ausschluss der ELF-Modulationskomponenten (50, 100, 1000, 2000 Hz) als induzierte Signale im Membranpotenzial der ORNs.
4. FDTD-Simulation mit realistischen Körperhaltungen: Winkelabhängige Feldverteilung an beiden Insektenantennen unter Massive-MIMO-Beamforming für realistische Geometrien.
5. Langzeit-Populationsstudie: Einzige Studie, die die demographische Kernhypothese direkt prüfen kann. Methodische Anforderungen: vollständige Konfundierungskontrolle, Randomisierung, Verblindung, statistische Power-Kalkulation vor Studienbeginn.
6. Längsschnittstudien über verschiedene Mobilfunkgenerationen: verursacht 5G durch seine technologische Neuheit und vermutete stärkere, biologische Interaktion einen deutlichen "Knick" in der Population?
7. Landschaftsstudie: mit einer genauen RF Bestrahlungskarte könnten Transsekt-Studien gemacht werden - mithin müssten in ähnlichen klimatischen Bedingungen Insektenichten schwanken mit der Strahlendichte, der die Landschaft ausgeliefert ist.
8. Auswertung von pheromonbasierten Insektenfallen: Abhängigkeit der Fangquoten von umgebender EMF - nicht nur feldstärkebasiert, sondern auch in Abhängigkeit der verschiedenen Feldmodulationen
9. Johnstonsches Organ: Auswirkungen von EMF auf dieses. Insekten benutzen dieses zur Detektion von Schallwellen (Flügelschlagfrequenzen), Wind(richtung) und elektrostatische Felder (Clarke et al., 2017). Wird ebenfalls zur Fluglagebestimmung benutzt, auch hierüber könnte ein Phantomvektor induziert werden
10. EMF hat nachweislich Einfluss auf Ionenkanäle: können über diesen Mechanismus auch Insekten verwirrt werden (d.h. Phantomvektor-Induktion via Ionenkanäle?)

8. Vorsorgemassnahme: Experimentelle Sendepause als wissenschaftliches Feldexperiment

8.1 Das wissenschaftliche Vorsorgeprinzip - nicht das politische

Das wissenschaftliche Vorsorgeprinzip (Rio-Deklaration, Prinzip 15, 1992) besagt: Bei wissenschaftlich nicht ausgeschlossenen schwerwiegenden Risiken soll das Ausbleiben vollständiger Kausalitätserkenntnis nicht als Begründung für Untätigkeit dienen. Es ist kein Argument für unbegrenzte Einschränkungen bei jedem theoretischen Risiko - sondern für verhältnismäßige Massnahmen bei plausiblen Risiken mit potenziell irreversiblen Konsequenzen.

Der Kollaps von Bestäuber-Populationen ist ein ökologisch irreversibler Schaden. Die Hypothese ist physikalisch plausibel. Die Forschungslücke ist real und wird in fast allen Studien explizit bestätigt.

8.2 Der Vorschlag: Räumlich und zeitlich begrenzte Expositionsreduktion als Feldexperiment

Statt dem allgemeinen Abschalten von Mobilfunkmasten könnte man ein wissenschaftlich konzipiertes Feldexperiment durchführen.

In definierten Habitaten - z. B. Naturschutzgebieten im Versorgungsbereich einzelner Basisstationen - wird die Sendeleistung in einem kontrollierten Design während der dokumentierten Hauptpaarungszeiten ausgewählter Indikatorspezies stark reduziert oder zeitlich eingeschränkt. Das Experiment hätte folgende Struktur:

- Kontroll-Habitate: Vergleichbare Gebiete ohne Expositionsreduktion
- Zeitfenster: Artenspezifisch, basierend auf publizierten Paarungsphänologien
- Messgrößen: Paarungsrate, Eizahl, Schlupfrate der Folgegeneration; EAG-Messungen vor, während und nach Exposition
- Dauer: Mehrere vollständige Generationszyklen
- Datentransparenz: Alle Rohdaten offen publiziert, Auswertung durch unabhängige Gruppe

Die Infrastruktur würde nicht dauerhaft verändert, der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn wäre substanziell.

9. Fazit

Die vorliegende Analyse ergibt folgende hierarchisch geordnete Schlussfolgerungen:

- Empirisch belegt (BEEFI-Studie, 2023): HF-EMF-Exposition reduziert die Reproduktionskapazität von Insekten um 18-31 % bei Feldstärken ab ~ 2 V/m. Pheromon-Verhaltenseffekte sind im Labor dokumentiert.
- Elektrotechnisch konsistent: ESA-Kopplung, dielektrisches Loading, Ion-Forced-Oscillation-Jamming und ephaptische Kohärenzsummation bieten formal schlüssige Pfade vom Feld zur neuronalen Interferenz.
- Neu und prüfbar: Der Osmotropotaxis-Störmechanismus durch differenzielle $\cos(\theta)$ -Feldkopplung ist eine originäre Hypothese mit direktem experimentellen Prüfungsweg über Dual-Kanal-EAG.
- 5G qualitativ verschieden: Nicht die zeitlich gemittelte Feldstärke, sondern Kohärenz, PAPR und ELF-Hüllkurvenstruktur machen 5G unter Umständen zum wirksamsten Standard für alle beschriebenen Störmechanismen.

- Demographisch unterschätzt: Der Extinction-Debt-Mechanismus macht Reproduktionsversagen in kurzfristigen Bestandsstudien systematisch unsichtbar.
- Regulatorisch unberücksichtigt: ICNIRP-Grenzwerte sind auf thermische Effekte beim Menschen ausgelegt. Eine ökologische Bio-EMV, die Reproduktionskommunikation von Wirbellosen berücksichtigt, existiert nicht.

APPELL

Die wissenschaftliche Gemeinschaft, Regulierungsbehörden und Netzbetreiber werden eingeladen, den vorgeschlagenen Forschungsrahmen zu unterstützen - im gemeinsamen Interesse an einer evidenzbasierten Antwort auf eine offene Frage.

10. Referenzen

Quelle	Inhalt	Journal / Quelle	URL
BAFU / SwissNIS (2025)	Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung - Jahresbericht 2024	<i>Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Projektkonsortium SwissNIS</i>	https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/sD58rIh8hY09/expositionsmessungen-nichtionisierende-strahlung-jahresbericht-2024-projektkonsortium-swissnis.pdf
Dahlman, E., Parkvall, S. & Skold, J. (2021)	5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology	Academic Press / Elsevier.	ISBN: 978-0-12-822320-8
Panagopoulos, D. J. et al. (2025)	A comprehensive mechanism of biological and health effects of anthropogenic extremely low frequency and wireless communication electromagnetic fields.	<i>Frontiers in Public Health (PMC12179773)</i>	https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1585441
Weaver, J. C. & Astumian, R. D. (1990)	The response of living cells to very weak electric fields: the thermal noise limit.	<i>Science</i> , 247(4941), 459-462	https://doi.org/10.1126/science.2300806
Aerts et al. (2019)	In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies	<i>IEEE Access</i> 9, 184658-184667	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961225
Balmori et al. (2015)	Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation	<i>Science of The Total Environment</i> , Volume 518-519	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.077
Bokil et al. (2001)	Ephaptic Interactions in the Mammalian Olfactory System	<i>J. Neuroscience</i> 21(4)	https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-20-10004.2001
Cammaerts, Marie-Claire et al. (2013)	Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electromagnetic radiation	<i>Electromagnetic Biology and Medicine</i> , Volume 32	https://doi.org/10.3109/15368378.2012.712877
Clarke et al. (2017)	The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception	<i>Journal of Comparative Physiology A</i>	https://doi.org/10.1007/s00359-017-1176-6
Dirzo et al. (2014)	Defaunation in the Anthropocene	<i>Science</i> 345(6195), 401-406	https://doi.org/10.1126/science.1251817
Mohamed et al. (2019)	Third-order neurons in the lateral horn enhance bilateral contrast of odor	<i>Frontiers in Physiology</i> , Volume 10 2019	https://doi.org/10.3389/

Quelle	Inhalt	Journal / Quelle	URL
	inputs through contralateral inhibition in <i>Drosophila</i>		fphys.2019.00851
Hallmann et al. (2017)	More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas	<i>PLOS ONE</i> 12(10)	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809
ICNIRP (2020)	Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz-300 GHz)	<i>Health Physics</i> 118(5), 483-524	https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210
ICNIRP (2025)	Gaps in knowledge relevant to the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)	<i>Health Physics</i> , 128(2), 190-202.	https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001944
Karipidis et al. (2023)	What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: a systematic map.	<i>Environmental Evidence</i> , 2023, 12:9	https://doi.org/10.1186/s13750-023-00304-3
Kaissling (2014)	Pheromone reception in insects: the example of silk moths	in: Mucignat-Caretta (Ed.): <i>Neurobiology of Chemical Communication</i> , CRC Press, Chapter 4	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK200991/
Kuussaari et al. (2009)	Extinction debt: a challenge for biodiversity conservation	<i>Trends in Ecology & Evolution</i> 24(10), 564-571	https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.04.011
Lázaro et al (2016)	Electromagnetic radiation of mobile telecommunication antennas affects the abundance and composition of wild pollinators	<i>Journal of Insect Conservation</i> 20(2):1-10	https://doi.org/10.1007/s10841-016-9868-8
Loizeau et al. (2023)	Comparison of ambient radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) levels in outdoor areas and public transport in Switzerland in 2014 and 2021.	<i>Environmental Research</i> , 237(Pt 1), 116921	https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116921
Mulot et al. (2023)	Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden	<i>Bericht im Auftrag des BAFU, Schweiz</i>	https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/0b2fNBtJRvd0/wirkung-von-nichtionisierender-strahlung-auf-arthropoden.pdf
Panagopoulos et al. (2021)	Human-made EMFs: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage	<i>International Journal of Oncology</i> 59	https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272
Sánchez-Bayo & Wyckhuys (2019)	Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers	<i>Biological Conservation</i> 232, 8-27	https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020
Schneider (1962)	Electrophysiological investigation on the olfactory specificity of sexual attracting substances in different species of moths	<i>Journal of Insect Physiology</i> 8(1)	https://doi.org/10.1016/0022-1910(62)90051-3
Takasaki et al. (2012)	Use of bilateral information to determine the walking direction during orientation to a pheromone source in the silkworm <i>Bombyx mori</i>	<i>Journal of Comparative Physiology A</i> 198(4), 295-307	https://doi.org/10.1007/s00359-011-0708-8
Thielens (2021)	Environmental impacts of 5G	<i>European Parliamentary Research Service</i>	https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690021/EPRS_STU(2021)690021_EN.pdf
Thielens et al.	Exposure of insects to radio-frequency	<i>Scientific Reports</i> 8,	https://doi.org/

Quelle	Inhalt	Journal / Quelle	URL
(2018)	electromagnetic fields from 2 to 120 GHz	3924	10.1038/s41598-018-22271-3
Thill, Cammaerts & Balmori (2024) [BEEFI]	Biological effects of electromagnetic fields on insects: a systematic review and meta-analysis	<i>Reviews on Environmental Health</i> 39(4), 853-869	https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0072
Wust et al. (2020)	Non-thermal effects of radiofrequency electromagnetic fields	<i>Scientific Reports</i> 10, 13488	https://doi.org/10.1038/s41598-020-69561-3
Zhang et al. (2019)	Asymmetric ephaptic inhibition between compartmentalized olfactory receptor neurons	<i>Nature Communications</i> 10, 1560	https://doi.org/10.1038/s41467-019-09346-z
3GPP TS 38.211 (2024)	5G NR physical channels and modulation - frame structure and numerology	3GPP RAN Technical Specification Group, Version 18, Mai 2024	https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/18.02.00_60/ts_138211v180200p.pdf

11. nicht referenzierte, weitere Studien

Quelle	Inhalt	Journal / Quelle	URL
Balmori (2021)	Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects	<i>Science of the Total Environment</i> 767, 144913	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144913
Helena Denac, Meike Mevissen & Günter Scholtysik (2000)	Structure, function and pharmacology of voltage-gated sodium channels	<i>Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology</i> , Volume 362, pages 453–479, (2000)	https://doi.org/10.1007/s002100000319