

Zum Einfluss von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Vögel: rechtliche Situation, wissenschaftlicher Stand und Empfehlungen für den Vogelschutz¹

Erich Bächler

Auf kurze Distanz kann nicht-ionisierende Strahlung (NIS) das Körpergewebe von Vögeln, insbesondere von Embryonen und Nestlingen, erwärmen und dadurch schädigen. Dieser thermische Effekt von NIS ist wissenschaftlich unbestritten, und Vögel müssen gemäss der geltenden Gesetzgebung davor geschützt werden. Aufgrund der räumlichen Nähe ist vor allem der Einbau von Funkanlagen in Gebäude, die von Vögeln als Niststandorte genutzt werden, heikel.

Ebenfalls wissenschaftlich klar nachgewiesen ist die Beeinflussung des Magnetkompasses der Vögel durch niedrig dosierte elektromagnetische Strahlung im Bereich bis etwa 100 MHz. Wie stark das Orientierungsvermögen von Zugvögeln durch solche Störquellen insgesamt beeinträchtigt wird, kann nicht abschliessend beurteilt werden; einerseits weiss man nicht, wie weit Störquellen verbreitet sind und auf welche Distanz sie wirken, andererseits können Vögel neben dem Magnetkompass auch andere Orientierungssysteme nutzen.

Unter kontrollierten Laborbedingungen konnte nahezu konsistent nachgewiesen werden, dass sowohl hochfrequente Strahlung wie auch niederfrequente magnetische Felder selbst im Niedrigdosisbereich den oxidativen Stress in den Körperzellen erhöht. Ebenfalls eindeutig ist die Beweislage zum Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf die Bildung von Stresshormonen und -proteinen oder den Melatoninhaushalt von Vögeln. Bei bestimmten Genotypen traten auch mehr embryonale Missbildungen auf und die Embryonalsterblichkeit war erhöht. Für hochfrequente elektromagnetische Strahlung sind diese Effekte etwas weniger klar.

Ob und in welchem Ausmass diese im Labor gefundenen nicht-thermischen Effekte von NIS die Vögel auch unter natürlichen Lebensbedingungen beeinträchtigen, ist schwierig zu beurteilen. Einerseits können Organismen negative Auswirkungen von NIS wie etwa oxidativen Stress mit Abwehrmechanismen bis zu einem gewissen Grad ausgleichen, wobei diese Fähigkeit bei jungen, älteren oder geschwächten Individuen allerdings eingeschränkt ist. Andererseits haben Schädigungen wie embryonale Missbildungen oft multifaktorielle Ursachen, etwa eine Kombination von genetischer Prädisposition und Umweltfaktoren, wobei die Einwirkung von NIS einer unter vielen sein kann. Hier bestehen erhebliche Wissenslücken, die durch Forschung geschlossen werden sollten.

Für weitere nicht-thermische Wirkungen von NIS wie etwa die Auslösung von Vermeidungsverhalten beziehungsweise die Beeinflussung von Populationsdichten gibt es aktuell keine ausreichende wissenschaftliche Evidenz. Auch bei einzelnen Fällen von massenhaft verstorbenen Vögeln konnte bisher kein Hinweis auf die Einwirkung von NIS gefunden werden.

¹ Eine französische Version dieses Beitrags erscheint in *Nos Oiseaux* 73 (1), 2026.

Flora und Fauna und somit auch die Vögel müssen aufgrund der geltenden Umweltgesetzgebung vor den negativen Auswirkungen von NIS geschützt werden. Da für Flora und Fauna aber keine entsprechenden Ausführungsbestimmungen erlassen wurden, wird deren Schutz nur äusserst lückenhaft vollzogen. Für eine systematische Umsetzung des gesetzlich verankerten Schutzes der Vögel vor NIS ist die Formulierung von allgemeingültigen Regeln und Grenzwerten daher unabdingbar. Die Schweizerische Vogelwarte Sempach empfiehlt, die Bestimmungen der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) auch auf die Vögel anzuwenden und insbesondere für Brutstandorte das Vorsorgeprinzip zu berücksichtigen.

Nichtionisierende Strahlung (NIS) ist heutzutage in Lebensräumen von Vögeln allgegenwärtig. Als NIS werden elektromagnetische Wellen bezeichnet, deren Energie nicht ausreicht, um Atombindungen zu lösen. Anders als nichtionisierende Strahlung kann ionisierende Strahlung Elektronen aus Atomen lösen oder Moleküle auftrennen und somit biologisches Gewebe schädigen; zur ionisierenden Strahlung zählt unter anderem die radioaktive Strahlung. Als NIS im Sinne der Gesetzgebung gelten elektrische und magnetische Felder mit Frequenzen von 0–300 GHz (vgl. Art. 2 Abs. 1 Bst. a der NISV, Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung). Neben zahlreichen anthropogenen Quellen von NIS wie etwa Bahnstrom, Netzstrom, TV- und Rundfunksender, Mobilfunk, WLAN, Radar oder Satellitenkommunikation gibt es auch NIS-Quellen natürlichen Ursprungs wie das statische Magnetfeld der Erde, Wärmestrahlung, das sichtbare Licht, sowie einen Teil der UV-Strahlung (Abb. 1).

Menschen, Tiere und Pflanzen müssen von Gesetzes wegen vor negativen Auswirkungen durch anthropogen verursachte NIS geschützt werden. Entsprechende Grenzwerte wurden aber nur für den Menschen definiert. Für Tiere und Pflanzen müssen gemäss Umweltschutzgesetz Einzelfallprüfungen durchgeführt werden, die auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft basieren sollen. Die vorliegende Übersicht fasst den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung über den Einfluss von NIS auf Vögel zusammen.

1. Rechtliche Grundlagen

Der Immissionsschutz ist bundesrechtlich im Umweltschutzgesetz (USG) und den darauf gestützten Verordnungen geregelt. Gemäss Art. 1 Abs. 1 USG müssen Menschen, Tiere und Pflanzen vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen geschützt werden. In Art. 1 Abs. 2 USG wird das sogenannte Vorsorgeprinzip definiert, das neben dem Menschen ebenfalls für Tiere und damit auch für Vögel gilt. Gemäss diesem Vorsorgeprinzip müssen Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig begrenzt werden (vergleiche auch Art. 11 Abs. 2 USG).

Für die Beurteilung dieser schädlichen oder lästigen Einwirkungen legt der Bundesrat durch Verordnung Immissionsgrenzwerte fest (Art. 13 Abs. 1 USG). Zu den vom Umweltschutzgesetz erfassten schädlichen oder lästigen Einwirkungen gehören auch die nichtionisierenden Strahlen (Art. 7 Abs. 1 USG). Explizite Vorgaben sind dabei in Artikel 14 USG für Luftverunreinigungen definiert. Diese Anforderungen gelten zwar vorab für Luftverunreinigungen, sie sind jedoch auch auf die Einwirkung von Strahlen anzuwenden, weil sie allgemeine Regeln wiedergeben (BGE 124 II 219 E. 7a; vergleiche auch BGer 1C_450/2010 E. 3.3).

Im Falle von brütenden Vögeln ist auch das Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugetiere und Vögel (JSG) relevant. Artikel 7 Absätze 4 und 5 JSG besagt, dass das Brutgeschäft der Vögel nicht

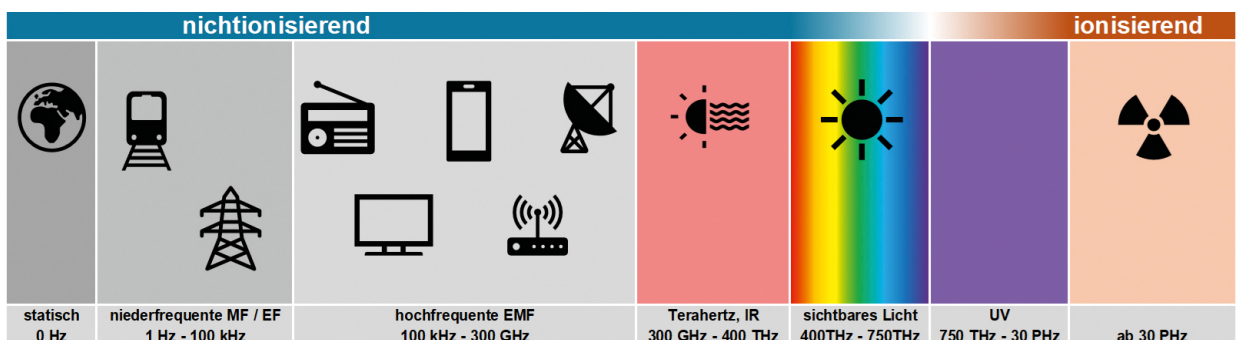


Abb. 1. Das elektromagnetische Spektrum.
The electromagnetic spectrum.

zu stören sei, beziehungsweise dass die Kantone den Schutz der Altvögel während der Brutzeit sicherstellen müssen. Zudem ist unter Strafe gestellt, wer vorsätzlich und ohne Berechtigung das Brutgeschäft der Vögel stört (Art. 17 Abs. 1 Bst. b JSG).

Für den Schutz des Menschen wurden in der NISV Grenzwerte festgelegt. Der Immissionsgrenzwert gilt überall dort, wo sich Menschen aufhalten können (vergleiche Art. 13 Abs. 1 NISV), und soll vor wissenschaftlich anerkannten Auswirkungen von NIS schützen. Der strengere «Anlagegrenzwert» gilt nur an Orten, wo sich Menschen über längere Zeit aufhalten (Orte mit empfindlicher Nutzung, OMEN; vergleiche Art. 3 Abs. 3 NISV) und soll Menschen vor möglichen Auswirkungen von NIS schützen. Der Anlagegrenzwert wurde gestützt auf das Vorsorgeprinzip des USG definiert und wird auch als Vorsorgegrenzwert bezeichnet.

Für Tiere und Pflanzen existiert keine Verordnung mit entsprechenden Grenzwerten. Da eine solche Regelung fehlt, ist im Einzelfall zu klären, ob die Immissionen schädlich oder lästig sind (Art. 12 Abs. 2 USG). Die Immissionsgrenzwerte sind dabei so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte Menschen, Tiere und Pflanzen nicht gefährden (Art. 14 Bst. a USG).

Im konkreten Fall, beispielsweise bei der Erteilung von Baubewilligungen von ortsfesten Anlagen, welche NIS erzeugen, muss also anhand von wissenschaftlichen Arbeiten beurteilt werden, ob der gesetzlich verankerte Schutz der Vögel vor NIS gewährleistet ist. Bei dieser Einzelfallbeurteilung gelten dieselben materiellen Grundsätze wie für die ordnungsmässige Festsetzung der Immissionsgrenzwerte (BGer 1C_338/2007 E. 4).

2. Übersicht über die wissenschaftlichen Arbeiten

2.1. Einleitung

Die Grenzwerte, die den Menschen vor negativen Auswirkungen von NIS schützen sollen, basieren auf den Empfehlungen der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Die ICNIRP ist ein als Verein organisierter internationaler Zusammenschluss von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, der als Nichtregierungsorganisation (NGO) von der EU und der WHO anerkannt ist. Die Empfehlungen der ICNIRP basieren jedoch lediglich auf dem thermischen Effekt (Erwärmung von Gewebe; siehe 2.5.1) von NIS, da die ICNIRP nur diesen als wissenschaftlich gesichert anerkennt. Im Sinne der Vorsorge hat die Schweiz teilweise strengere Grenzwerte als die

von der ICNIRP empfohlenen eingeführt. Die ICNIRP unterscheidet bei der Beurteilung der Effekte von NIS zwischen statischen elektrischen und magnetischen Feldern (0 Hz), niederfrequenten elektromagnetischen Feldern (1 Hz bis 100 kHz) und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (100 kHz bis 300 GHz). Die vorliegende Übersicht orientiert sich ebenfalls an dieser Einteilung (Abb. 1).

2.2. Statische magnetische Felder

Ein statisches magnetisches Feld ist ein Kraftfeld, dessen Stärke und Richtung konstant sind. Statische Magnetfelder können beispielsweise durch Konstantmagnete oder von mit Gleichstrom durchflossenen Leitern verursacht werden, aber auch das Magnetfeld der Erde ist ein statisches magnetisches Feld.

Der in der NISV definierte Immissionsgrenzwert, der Menschen vor negativen Auswirkungen von statischen magnetischen Feldern schützen soll, beträgt 40 mT (Millitesla; T = Tesla, Einheit der magnetischen Flussdichte). Ein Anlagegrenzwert wurde nicht definiert.

Vögel können das Magnetfeld der Erde für die Orientierung nutzen (Mouritsen 2018). In zahlreichen experimentellen Arbeiten wurde gezeigt, dass der Magnetkompass von Vögeln durch künstlich erzeugte statische Magnetfelder mit Feldstärken im Bereich des Erdmagnetfeldes (30–60 Mikrottesla μ T) beeinflusst werden kann (Wiltschko 1968, Wiltschko et al. 2007, Packmor et al. 2021). Weiter kann der magnetische Orientierungssinn von Vögeln durch kurze und sehr starke (0,1–0,5 T) magnetische Pulse beeinflusst werden (Beason et al. 1997, Wiltschko et al. 2002, Holland und Helm 2013). Auch die Funktion der Zirbeldrüse und damit die Melatoninsekretion kann durch künstlich erzeugte statische Magnetfelder verändert werden (Semm 1992, Schneider et al. 1994a). Melatonin spielt bei der Steuerung des tageszeitlichen Rhythmus der Vögel eine wichtige Rolle (Helm und Liedvogel 2024), und da diese innere Uhr auch für die Orientierung relevant ist, kann eine Beeinflussung des Melatoninhaushaltes auch die Orientierungsfähigkeit der Vögel beeinträchtigen (Schneider et al. 1994b).

Abgesehen von der Beeinflussung des Magnetkompasses gibt es nur sehr wenige Studien zum Einfluss schwacher statischer Magnetfelder auf die Entwicklung von Hühner- und Wachtelembryonen (Thalau 2002, Driessen et al. 2020). In die Metaanalyse von Driessen et al. (2020) flossen die Resultate von elf Studien an Wirbeltieren ein, wobei zwei davon an Wachteln durchgeführt wurden. Bei einigen dieser Studien wurden zwar Hinweise auf eine Beeinflussung von Physiologie und Verhalten durch schwache statische Magnetfelder gefunden, aber insgesamt waren die Resultate zu unein-

heitlich, um daraus gültige Schlüsse ziehen zu können. Bei der Interpretation der Resultate war teilweise nicht einmal klar, ob diese nun positive oder negative Auswirkungen auf die Tiere hatten (Driessen et al. 2020).

2.3. Statische elektrische Felder

Statische elektrische Felder entstehen zwischen getrennten, unterschiedlichen elektrischen Potentialen. Je grösser die Potentialdifferenz, desto höher ist die elektrische Feldstärke. Technisch erzeugte elektrische Gleichfelder entstehen z.B. bei Gleichstromübertragungsleitungen, Gleichstrombahnen (Trams) oder Batterien. Statische elektrische Felder kommen aber auch natürlicherweise überall in der Umwelt vor. Sie können etwa unter Gewitterwolken Stärken von mehreren kV/m erreichen (WHO 2006). Die statische Aufladung durch Reibung kann an menschlichen Körpern sehr starke elektrische Felder von bis zu 500 kV/m erzeugen (Petri et al. 2017). Statische elektrische Felder dringen aufgrund der gut leitenden Oberfläche von menschlichen und tierischen Körpern aber kaum in diese ein, sondern laden die Körperoberfläche auf (WHO 2006). Bei Berührung mit einem geerdeten Objekt kommt es zur Entladung, die durch sensorische Stimulation als unangenehm wahrgenommen werden kann.

In einer Metaanalyse zum Einfluss statischer elektrischer Felder auf Wirbeltiere wurden zwar teilweise Auswirkungen auf Physiologie und Verhalten gefunden, bei diesen handelt es sich aber mit grosser Wahrscheinlichkeit um sekundäre Reaktionen auf die sensorische Stimulation, die bei der Entladung der Felder auf der Körperoberfläche auftritt (Petri et al. 2017). Abgesehen von der sensorischen Stimulation wurden bisher keine belastbaren Nachweise für weitere negative Auswirkungen von statischen elektrischen Feldern auf Menschen und Tiere gefunden, weshalb auch keine entsprechenden Grenzwerte festgelegt wurden.

2.4. Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Niederfrequente (1 Hz–100 kHz) elektrische und magnetische Felder (NF-EF und NF-MF) ändern periodisch ihre Stärke (Wechselfelder auch die Richtung) und werden durch Wechselströme oder gepulste Gleichströme verursacht. Hauptsächlich Quellen von NF-EF und NF-MF sind das Bahnnetz (16,7 Hz) und die öffentlichen Stromnetze (50 Hz) mit Übertragungsleitungen und Verbrauchergeräten. Bei Niederfrequenz sind die elektrischen und magnetischen Komponenten in der Regel nicht gekoppelt und breiten sich daher nicht als elektromagnetische Welle im Raum aus.

Niederfrequente Magnetfelder induzieren im Körper von Menschen und Tieren Ströme, die ihrerseits Nerven stimulieren können (ICNIRP 2010). Zum Schutz des Menschen vor diesen wissenschaftlich unbestrittenen biologischen Effekten hat die ICNIRP Grenzwerte formuliert, auf denen die Immissions- und Anlagegrenzwerte der NISV beruhen. Die Immissionsgrenzwerte für elektrische Wechselfelder betragen 10 000 V/m für Bahnanlagen (16,7 Hz) und 5000 V/m für Netzstrom (50 Hz). Für magnetische Wechselfelder gelten Grenzwerte von 300 μ T (16,7 Hz) und 100 μ T (50 Hz). Die strengereren Anlagegrenzwerte wurden nur für Magnetfelder definiert und betragen für Netz- und Bahnstrom 1 μ T. Für Bahnstrom ist der Anlagegrenzwert gemittelt über 24 Stunden einzuhalten.

2.4.1. Laborstudien

Für die Erforschung der Wirkung von NIS auf den Menschen werden aus nachvollziehbaren ethischen Gründen oft Tiermodelle eingesetzt. Es kommen v.a. Mäuse und Ratten, aber auch Hühner oder Wachteln zum Einsatz (Brent 1999, Thalau 2002). Deshalb liegen Arbeiten zum Einfluss von NF-EF und NF-MF auf Hühner und Wachteln, in erster Linie im Embryonalstadium, in relativ grosser Zahl vor (Übersichten in Brent 1999, Thalau 2002, Rajendra et al. 2004, Juutilainen 2005, Shafey et al. 2006, Nishimura et al. 2009, Pourslis 2009, Mild und Mattsson 2010 sowie neuere Einzelstudien in Roda et al. 2011, Nishimura et al. 2013, Pawlak et al. 2013, Lis 2019). Die meisten dieser Studien wurden bei einer Frequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz (Frequenz der Stromversorgung in Europa bzw. den USA) durchgeführt.

Viele Arbeiten wurden zur teratogenen Wirkung (äussere Einflüsse, die Missbildungen bewirken können) von NF-EF/MF und der Embryonalsterblichkeit durchgeführt. Befruchtete Hühnereier wurden in Inkubatoren unter dem Einfluss von NF-MF bebrütet und anschliessend untersucht. Dabei konnten bereits für schwache Magnetfelder höhere Missbildungsraten festgestellt werden (Farrell et al. 1997). Die Resultate dieser Studien waren jedoch uneinheitlich und schwierig zu reproduzieren (Juutilainen und Saali 1986, Berman et al. 1990). Verschiedene Autoren zeigten, dass genetische Unterschiede zwischen den untersuchten Hühnerembryonen für diese vermeintlich widersprüchlichen Resultate verantwortlich waren (Farrell et al. 1997, Di Carlo und Litovitz 1999, Thalau 2002). Während gewisse Genotypen auf den Einfluss von NF-MF reagieren, scheint dies bei anderen nicht der Fall zu sein. Die Ursachen von embryonalen Missbildungen sind zudem in der Regel multifaktoriell, wobei neben der genetischen Prädisposition auch Umwelteinflüsse eine Rolle spielen (Thalau 2002). Neben der teratogenen Wirkung konnten weitere Einflüsse von NF-MF auf Hühnerembryo-

nen gezeigt und auch reproduziert werden (Mild und Mattsson 2010), so etwa eine erhöhte Aktivität des Enzyms Ornithindecaboxylase (ODC), das für das Zellwachstum wichtig ist, eine Erhöhung des oxidativen Stresslevels (siehe auch 2.5.2., Oxidativer Stress) oder die Produktion von Stressproteinen (Hsp70).

Bemerkenswert ist, dass die beobachteten Effekte bereits bei sehr tiefen Feldstärken im Bereich des Anlagegrenzwerts der NISV (1 μ T) auftraten. Es ist heute wissenschaftlich weitgehend anerkannt, dass biologische Systeme durch schwache EF/MF und EMF (elektromagnetische Felder) beeinflusst werden können (Landler und Keays 2018, Zadeh-Haghighi und Simon 2022). Wie diese Effekte genau zustande kommen, ist noch nicht abschliessend geklärt. Mögliche Rezeptoren für niedrigdosierte EF/MF und EMF sind Cryptochrom-Proteine (CRY), die sowohl in Pflanzen als auch in Tieren nachgewiesen wurden und eine Vielzahl von physiologischen Prozessen wie die tageszeitliche Rhythmik oder die Bildung von reaktiven Sauerstoffverbindungen und damit das oxidative Gleichgewicht regulieren (Juutilainen et al. 2018, Sherrard et al. 2018, Karki et al. 2021). Bei Vögeln sind CRY zentral für die Magnetfeldorientierung (siehe 2.5.2., Orientierung). Neben den CRY könnten aber auch Magnetitpartikel als biologische Rezeptoren für NIS eine Rolle spielen. Diese sind möglicherweise ebenfalls in die Orientierungsmechanismen von Zugvögeln involviert (Holland und Helm 2013).

Weitere Laborstudien wurden an Küken und adulten Vögeln durchgeführt, wobei Parameter wie Schlupfraten, Wachstum und Entwicklung, Legeraten, Futteraufnahme, Geschlechterverhältnis (Durfee et al. 1975, Krueger et al. 1975, Veicsteinas et al. 1996, Sun et al. 2010, Roda et al. 2011), morphologische Merkmale (Shafey et al. 2006), Lernverhalten und Gedächtnisleistung (Che et al. 2007, Sun et al. 2010) oder der tageszeitliche Rhythmus (Lintzen et al. 1989) untersucht wurden. Eine ganze Reihe von Untersuchungen wurde an Buntfalken *Falco sparverius* durchgeführt (Ferne und Reynolds 2005), wobei Fertilität, Embryonalentwicklung, Eigrösse und Anzahl flügger Jungvögel, Dicke der Eischalen und die Schlupfraten untersucht wurden. Bei einigen dieser abhängigen Variablen wurden Effekte von NF-EF/MF gefunden, bei anderen nicht (Ferne und Reynolds 2005).

Da all diese Studien unter unterschiedlichen Expositionsbedingungen und teilweise an unterschiedlichen Arten durchgeführt wurden und auch keine Arbeiten repliziert wurden, ist deren Interpretation im Hinblick auf allgemeingültige Aussagen schwierig.

2.4.2. Untersuchungen im Freiland

Ob unter kontrollierten Laborbedingungen erarbeitete Befunde auch für die Situation im Freiland Gültigkeit haben, muss mit entsprechenden Feldstudien validiert werden. Da im Freiland neben den NF-EF/MF noch weitere mögliche Einflussfaktoren wirken und es schwierig ist, diese zu kontrollieren, ist die Durchführung von aussagekräftigen Feldstudien sehr aufwändig. Entsprechend wurden weitaus weniger Arbeiten zum Einfluss von NF-EF/MF auf Vögel unter Freilandbedingungen durchgeführt.

In den meisten dieser Studien wurden der Bruterfolg sowie weitere Brutparameter von Vögeln im Bereich von Hochspannungsleitungen mit dem Bruterfolg von Individuen derselben Art ausserhalb des Einflussbereichs von Hochspannungsleitungen, aber in ähnlichen Habitaten verglichen. Beim Turmfalken *Falco tinnunculus* (Costantini et al. 2007, Dell'Omo et al. 2009) und dem Königsbussard *Buteo regalis* (Gilmer und Wiehe 1977) konnten keine auffälligen Unterschiede bezüglich des Wachstums, der Anzahl flügger Jungvögel, des Melatoninspiegels, des Leukozytengehalts im Blut, oxidativen Stresses oder des Bruterfolgs zwischen exponierten Vögeln und Kontrollen gefunden werden. Doherty und Grubb (1998) fanden bei unter Hochspannungsleitungen brütenden Sumpfschwalben *Tachycineta bicolor* einen tieferen Bruterfolg als bei Kontrollnestern abseits von Hochspannungsleitungen, während dies beim Hauszaunkönig *Troglodytes aedon* nicht der Fall war. Hamann et al. (1998) fanden, dass sich die Eigrössen von Kleiber *Sitta europaea* und Tannenmeise *Periparus ater* in exponierten Nestern nicht von jenen in Kontrollnestern unterschieden, während die Eier der Blaumeise *Cyanistes caeruleus* in exponierten Nestern grösser und jene der Kohlmeise *Parus major* kleiner waren als in den Kontrollnestern. Weiter schienen die NF-EF/MF bei keiner der untersuchten Arten einen Einfluss auf den Zeitpunkt des Legebeginns zu haben, während die Gelegegrössen der Kohlmeise im Einflussbereich der NF-EF/MF vermindert und totale Brutverluste beim Kleiber häufiger waren. Im Gegensatz dazu fanden Tomás et al. (2012) in einer ähnlichen Feldstudie, dass Gelegegrösse und Eivolumen von Kohlmeisen unter Einfluss von NF-EF/MF grösser waren, aber am Ende kein Unterschied im Reproduktionserfolg oder dem Gewicht der Jungvögel zwischen exponierten Nestern und Kontrollen festzustellen war. Fernie et al. (2000) untersuchten bei gekäfigten Buntfalken verschiedene Verhaltensparameter in Abhängigkeit von NF-EF/MF. Einige dieser Parameter waren unter Einfluss von NF-EF/MF erhöht (z.B. Aktivität, Aufmerksamkeit), andere wiederum verringert (z.B. Gefiederpflege, Ruhen), wobei die Unterschiede zudem geschlechtsspezifisch waren und abhängig davon, ob die Vögel am Brüten, Balzen



Abb. 2. Im Labor konnte gezeigt werden, dass niederfrequente elektrische und magnetische Felder die Gesundheit von Vögeln beeinträchtigen können. Ob dies auch unter Freilandbedingungen, wie etwa bei diesen auf einer Starkstromleitung brütenden Weissstörchen *Ciconia ciconia* der Fall ist, ist nicht klar. Foto Klaus Walther.

*Laboratory tests have shown that low-frequency electric and magnetic fields can affect the health of birds. It is not clear whether this is also the case under field conditions, such as with these White Storks *Ciconia ciconia* nesting on a high-voltage power line.*

oder Aufziehen der Jungvögel waren. Zwei Studien zum Einfluss eines NF-Senders (Hanowski et al. 1996) beziehungsweise einer Hochspannungsleitung (Niemi und Hanowski 1984) auf die Populationsdichte von Vögeln, in die neben den NF-EF/MF weitere potenzielle Einflussfaktoren einbezogen wurden, fanden, dass die Unterschiede in erster Linie auf Habitat und Untersuchungsjahr zurückzuführen waren und nicht auf den Einfluss von NF-EF/MF.

Aufgrund der uneinheitlichen Resultate der oben genannten Studien ist es schwierig, generelle Aussagen über den Einfluss von NF-EF/MF auf Vögel im Freiland zu machen, zumal für viele der beobachteten Auswirkungen nicht einmal klar ist, ob sie positive oder negative Konsequenzen für die Vögel haben. Erschwerend kommt hinzu, dass kaum Arbeiten mit denselben Arten und unter ähnlichen Bedingungen repliziert wurden und mit wenigen Ausnahmen nur eine unabhängige Variable (NF-EF/MF) einbezogen wurde, während an-

dere potenzielle Einflussfaktoren auf die untersuchte (abhängige) Variable nicht berücksichtigt wurden. Zum Einfluss von NF-EF/MF auf Vögel im Freiland bestehen erhebliche Wissenslücken. Insbesondere mangelt es an sorgfältig durchgeführten Studien, die neben den NF-EF/MF auch weitere potenzielle Einflussfaktoren berücksichtigen.

2.5. Hochfrequente elektromagnetische Wechselfelder (HF-EMF)

Da bei hochfrequenter Strahlung (100 kHz bis 300 GHz) elektrische und magnetische Felder gekoppelt sind, spricht man von elektromagnetischen Feldern. HF-EMF breiten sich wellenförmig im Raum aus. Deshalb werden sie in erster Linie für die drahtlose Übertragung von Information verwendet. Quellen von HF-EMF sind etwa Funkanwendungen, Radio- und TV-Sender, Mobilfunk, WLAN, Radar oder Richtfunkverbindungen.

In naher Zukunft wird auch die vermehrte Nutzung von Frequenzen oberhalb von 6 GHz stark zunehmen, etwa für Mobilfunk und Satellitenkommunikationssysteme wie Starlink, OneWeb oder Kuiper.

Die Immissionsgrenzwerte in der NISV, die den Menschen vor den wissenschaftlich anerkannten Wirkungen von HF-EMF schützen sollen, sind frequenzabhängig und liegen beispielsweise für den Mobilfunk im Bereich von 28–61 V/m. Die strengeren Anlagegrenzwerte, die dem Vorsorgeprinzip im USG Rechnung tragen, sind etwa zehnmal tiefer und liegen aktuell für Funkanlagen zwischen 3 und 6 V/m.

2.5.1. Thermische Effekte

HF-EMF dringen je nach Frequenz mehr oder weniger tief in den Körper ein, werden dort in thermische Bewegungsenergie umgewandelt und erwärmen das Gewebe. Es ist derselbe Effekt, der auch in Mikrowellenöfen zur Anwendung kommt. Diese bekannte und wissenschaftlich unbestrittene Wirkung von HF-EMF wird als «thermischer Effekt» bezeichnet (ICNIRP 2020). Das physikalische Prinzip der Erwärmung des Gewebes durch HF-EMF gilt für Vögel genauso wie für den Menschen und alle anderen biologischen Organismen (European Parliament 2021).

Die Einhaltung einer optimalen Eitemperatur während der Brutphase ist für die Schlupfrate, aber auch für die Vitalität der Jungvögel entscheidend (DuRant et al. 2013). Vogeleier sind insbesondere anfällig für erhöhte Temperaturen (Hyperthermie) während der Brutphase (Webb 1987, Peterka et al. 1996). Bereits eine Temperaturerhöhung von mehr als 0,5 °C kann die Embryonen schädigen (Brown 1988, Thalau et al. 2003). In einer experimentellen Studie an Hühnereiern konnte gezeigt werden, dass HF-EMF mit einer Frequenz von 1,25 GHz und einer Leistungsflussdichte ab 1,25 mW/cm² (entspricht einer elektrischen Feldstärke von 69 V/m) zu einer Temperaturerhöhung in Hühnereiern führt, die die Embryonen schädigen kann (Thalau et al. 2003). Vogeleier, beziehungsweise die darin enthaltenen Embryonen, erwärmen sich unter dem Einfluss von HF-EMF aus verschiedenen Gründen stärker als menschliche Föten: Bei menschlichen Föten wird ein erheblicher Anteil der HF-EMF durch mehrere Gewebeschichten von Bauchdecke, Fettgewebe und Uterus des Mutterleibs absorbiert, was bei Vogeleiern nicht der Fall ist (Thalau 2002). Da die Länge der meisten Vogeleier im Bereich der halben Wellenlängen der Mobilfunkstrahlung liegen, können im Bereich dieser Frequenzen zudem Resonanzeffekte auftreten, die die spezifische Absorptionsrate erhöhen (Thalau 2002, Thalau et al. 2003, ICNIRP 2020). Möglicherweise schirmt der Körper des brütenden Altvogels die Eier im Nest zu einem gewissen Grad vor den HF-EMF ab. Während

der Brutpausen, die brütende Vögel regelmässig einlegen, besteht dieser Schutz aber nicht und auch nicht bei Nestlingen, die von den Altvögeln nicht mehr gewärmt werden, sobald sie ihre Körpertemperatur selbst regulieren können. Zudem ist bekannt, dass brütende Vögel bei erhöhten Umgebungstemperaturen die Brutpausen eher verlängern, damit die Eier nicht überhitzt werden (DuRant et al. 2013), was im Falle der Einwirkung von HF-NIS kontraproduktiv wäre. Nicht zuletzt stellen anthropogene Wärmequellen wie die thermischen Effekte von HF-NIS angesichts der klimabedingt steigenden Umgebungstemperaturen eine zusätzliche Herausforderung für brütende Vögel dar (Griffith et al. 2016).

Die Embryonalentwicklung ist für alle Lebewesen und speziell für Vögel eine besonders vulnerable Phase (Peterka et al. 1996, Thalau 2002). Insbesondere während der Periode der Organbildung, die in den ersten ca. 10 Tagen der Bebrütung stattfindet, sind Vögel wie auch andere tierische Organismen am stärksten durch teratogene Einflüsse gefährdet (Peterka et al. 1996, Thalau 2002). In der ersten Woche der Entwicklung eines Vogeleis besteht dieses zu ca. 80 % aus Wasser; der Embryo macht nur einen kleinen Teil des Volumens aus. In diesem Stadium absorbiert das Ei aufgrund seiner Zusammensetzung mehr Strahlungsenergie als gegen Ende der Brutzeit, wenn der Embryo das Ei fast vollständig ausfüllt (Thalau et al. 2003). Vogelembryonen und auch die nicht flüggen Jungvögel haben keine Möglichkeit, sich vor der Strahlung zu schützen oder sich dieser zu entziehen. Während der Brut- und Nestlingsphase sind Eier und Nestlinge wie auch die brütenden Altvögel der Strahlung permanent ausgesetzt.

Thermische Effekte treten nur bei hohen Feldstärken auf, d.h. entweder bei sehr leistungsstarken Anlagen oder in unmittelbarer Nähe zu HF-Sendern. Zudem müssen Vögel und Eier der Strahlung während einer gewissen Zeit ausgesetzt sein, damit sich ihre Temperatur erhöht. Thalau et al. (2003) konnten experimentell zeigen, dass die durch HF-EMF induzierte Temperaturerhöhung von Hühnerembryonen nach 40–50 min das Maximum erreicht. Ein blosser Flug eines Vogels durch ein HF-EMF reicht also sicher nicht aus, um thermische Effekte hervorzurufen. Jedoch ist die Brut- und Nestlingsphase, die je nach Vogelart 30 und mehr Tage dauert, dazu bei weitem ausreichend lang.

Mobilfunkanlagen werden immer öfter in zentral gelegene Kirch- und andere Türme eingebaut. Oftmals sind solche Gebäude aber auch wichtige Niststandorte für Koloniebrüter wie Dohlen *Coloeus monedula*, Alpen- *Tachymarptis melba* oder Mauersegler *Apus apus* (Abb. 3). Aufgrund der räumlichen Nähe von Brutkolonien und Sendeantennen können die Bruten von thermischen Effekten betroffen sein. Sakraoui et al. (2024) stellten bei direkt auf Mobilfunkantennen brütenden Weissstörchen *Ciconia ciconia* in Algerien eine massiv

tiefer Überlebensrate der Jungvögel fest, verglichen mit Storchennestern, die nicht direkt auf Antennenanlagen gebaut wurden. Da die thermischen Wirkungen der HF-EMF wissenschaftlich unbestritten sind, ist ein entsprechender Schutz der Vögel aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen für die Bewilligung einer Sendeanlage zwingend, wobei auch die Bestimmungen über das Vorsorgeprinzip berücksichtigt werden müssen, da Vögel während der Brut- und Nestlingszeit besonders gefährdet sind.

2.5.2. Nicht-thermische Effekte

Auswirkungen von HF-EMF auf Organismen, die nicht durch eine Erhöhung der Körpertemperatur hervorgerufen werden, werden als nicht-thermische Effekte bezeichnet. Wissenschaftlich unbestritten und sehr gut untersucht ist die Beeinflussung der Magnetorientierung von Vögeln durch HF-EMF. Für die Erhöhung von

oxidativem Stress und für weitere molekulare Prozesse, welche durch HF-EMF induziert werden, gibt es zumindest starke Hinweise (Mevissen und Schürmann 2021). Für andere nicht-thermische Effekte von HF-EMF, wie etwa die Beeinflussung der räumlichen Verteilung von Vögeln oder deren Bruterfolg, gibt es keine genügende wissenschaftliche Evidenz.

Orientierung: Vögel nutzen zur Orientierung neben anderen Quellen das Erdmagnetfeld. Dieser Magnetsinn basiert sehr wahrscheinlich auf dem Radikalpaar-Mechanismus (RPM), der in speziellen Proteinen (Cryptochrome) der Netzhaut im Auge abläuft (Mouritsen 2018). In mehreren Forschungsarbeiten an gekäfigten Vögeln wurde nachgewiesen, dass der Magnetsinn durch schwache, breitbandige HF-EMF mit Feldstärken im Bereich der Anlagegrenzwerte der NISV gestört werden kann. Ritz et al. (2004) fanden dies für ein Breitbandfeld von 0,1–10 MHz und einer magnetischen Feldstärke von 85 nT, Schwarze et al. (2016) für 2 kHz–



Abb. 3. Kirchtürme sind als Standorte für Mobilfunkanlagen begehrt, da sie oft zentral in dicht besiedelten Gebieten stehen und weil die Antennen im Innern montiert werden können, so dass sie für die Bevölkerung nicht sichtbar sind. Sind solche Türme aber gleichzeitig Niststandorte für Segler (im Bild Alpensegler *Tachymarptis melba*) und andere Vögel, so kann die Strahlung der Antennen die Vögel gefährden. Foto Freiburg im Breisgau (Baden-Württemberg), Ralph Martin.

*Church towers are sought-after locations for mobile phone masts because they are often centrally located in densely populated areas and because the antennas can be installed inside, making them invisible to the public. However, if such towers are also nesting sites for swifts (shown are Alpine Swifts *Tachymarptis melba*) and other birds, the radiation from the antennas can endanger the birds.*

9 MHz und 1 nT und Muheim und Phillips (2023) für 50 kHz–25 MHz und 17 nT. Engels et al. (2014) konnten eine Störung des Magnetsinns selbst bei im urbanen Gebiet üblicherweise vorkommenden HF-EMF (20 kHz–5 MHz, 1 nT) zweifelsfrei nachweisen. In weiteren Laborstudien konnte die Beeinflussung des Magnetsinns auch für experimentell erzeugte HF-EMF bis 85 MHz und maximal 5,6 nT nachgewiesen werden (Leberecht et al. 2022). Aufgrund theoretischer Überlegungen, basierend auf der Funktionsweise des Radikalpaar-Mechanismus, wird eine Obergrenze von rund 116 MHz für die Beeinflussung des Magnetorientierungssinns von Vögeln postuliert (Leberecht et al. 2023). In entsprechenden Versuchen konnten Leberecht et al. (2023) für Frequenzen zwischen 140 und 150 MHz und 235–245 MHz denn auch keine Beeinflussung des Magnetkompasses mehr finden. Auch für die Frequenzbänder von Mobilfunkanlagen (in der Schweiz aktuell zwischen 700 MHz und 3,8 GHz) gibt es zurzeit keine Hinweise auf eine Beeinflussung des Orientierungsvermögens von Vögeln.

Obwohl klar erwiesen ist, dass der Magnetsinn der Vögel durch sehr schwache HF-EMF gestört werden kann, bedeutet dies nicht, dass Zugvögel in ihrem natürlichen Lebensraum die Orientierungsfähigkeit vollständig verlieren, denn es ist unklar, wie weit verbreitet HF-EMF sind, die den Magnetsinn der Vögel beeinträchtigen können, und auf welche Distanzen sie wirken (Engels et al. 2014). Zudem verfügen Zugvögel neben dem magnetischen Orientierungssinn über weitere Kompasssysteme (Sternbilder, Sonne, Polarisationsmuster des Himmelslichts), die sie parallel nutzen können. In begrenztem Masse sind sie sogar in der Lage, ein Orientierungssystem, das gestört wurde, anhand der anderen Systeme neu zu eichen (Cochran et al. 2004, Muheim et al. 2006). Redundante Orientierungssysteme und Möglichkeiten zu deren Rekalibrierung sind für ziehende Vögel essenziell, da nicht alle Systeme jederzeit zur Verfügung stehen. So kann der magnetische Orientierungssinn auch durch natürliche Ursachen wie Magnetfeldanomalien oder geomagnetische Stürme, verursacht durch Sonneneruptionen, beeinträchtigt werden (Alerstam 1987, Wiltschko und Wiltschko 2003, Bianco et al. 2019). Auch kann der magnetische Inklinationskompass bei der Überquerung des Äquators nicht verwendet werden, da dort die magnetischen Feldlinien parallel zur Erdoberfläche verlaufen (Wiltschko und Wiltschko 1996). Problematisch wird es aber dann, wenn neben dem magnetischen Orientierungssinn auch andere Orientierungssysteme nicht zur Verfügung stehen. Gulson-Castillo et al. (2023) beobachteten, dass die Kombination von geomagnetischen Stürmen und bedecktem Himmel zu einer Reduktion des Zuggeschehens und Schwierigkeiten bei der Navigation führte. Tonelli et al. (2023)

stellten anhand der Fangdaten von 2 Millionen Vögeln in Nordamerika über 60 Jahre fest, dass sogenannte Irrgäste, also Vögel, die weit abseits ihres normalen Aufenthaltsgebiets gefangen wurden, vor allem dann gefunden wurden, wenn das Magnetfeld der Erde durch geomagnetische Stürme gestört war.

Oxidativer Stress: Die Aufrechterhaltung des oxidativen Gleichgewichtes ist zentral für das Funktionieren eines Organismus. Werden in Körperzellen zu viele reaktive sauerstoffhaltige Moleküle (ROS) gebildet, so entsteht oxidativer Stress, der den Organismus schädigen kann (Mevissen und Schürmann 2021). HF-EMF stehen seit längerem in Verdacht, oxidativen Stress auszulösen. Neuere Forschungsergebnisse aus Tier- und Zellstudien erhärten diesen Verdacht auch für schwache HF-EMF im Bereich der Immissions- und Anlagegrenzwerte der NISV (Sherrard et al. 2018, Mevissen und Schürmann 2021). Dies wurde auch in Studien an Vögeln festgestellt. Yakymenko et al. (2018) fanden eine erhöhte Bildung von ROS bei Wachtelembryonen in einem 1800-MHz-Feld mit einer elektrischen Feldstärke von 1,1 V/m und Burlaka et al. (2013) bei einer Frequenz von 900 MHz und 0,97 V/m. Gupta und Srivastava (2022) stellten dies bei Hühnern unter dem Einfluss von HF-EMF mit 2,45 GHz und 21,8 V/m fest.

Oxidativer Stress beschleunigt den Abbau von Telomeren, die die Enden der Chromosomen in der Zelle schützen, und verkürzt so die Lebensdauer der Zelle. Die Telomerlänge hat einen direkten Einfluss auf die Lebenserwartung eines Organismus (Monaghan 2014). Oxidativer Stress ist ursächlich an der Entstehung von Krebs, aber auch an Neurodegeneration und Teratogenese beteiligt (Mevissen und Schürmann 2021). Eine kurzfristige Erhöhung von oxidativem Stress bedeutet aber noch nicht, dass ein Organismus längerfristig geschädigt wird, denn Zellen und Organismen verfügen über antioxidative Schutzmechanismen. Diese Abwehrmechanismen haben aber Grenzen, vor allem wenn mehrere Stressoren gleichzeitig auf einen Organismus einwirken. Zudem zeigen Studien, dass sehr junge und auch alte Individuen weniger effizient auf oxidativen Stress reagieren können (Mevissen und Schürmann 2021). Auch bezüglich oxidativen Stresses kommt also dem Schutz von Nestern und Jungvögeln vor HF-EMF eine besondere Bedeutung zu.

Laborstudien zu weiteren möglichen Effekten von HF-EMF: Neben den Arbeiten zum Einfluss von HF-EMF auf Orientierung und oxidativen Stress gibt es eine ganze Reihe von Laborstudien, in denen Faktoren wie Reproduktionserfolg, Embryonalsterblichkeit, Missbildungen, Entwicklung, Verhalten und weitere physiologische Parameter von Vögeln unter dem Einfluss von HF-EMF untersucht wurden. Eine systematische Übersicht über diese Studien findet sich in Karipidis et al. (2023), Zusammenfassungen der Ergebnisse

in Thalau (2002), Heynick und Merritt (2003), Juutilainen (2005), Cucurachi et al. (2013) und Pophof et al. (2023). Insgesamt sind auch die Schlussfolgerungen dieser Studien uneinheitlich. Viele der älteren Studien weisen zudem methodische Mängel auf (Thalau 2002, Karipidis et al. 2023). Vor allem bei den Studien, die vor 1990 publiziert wurden, dürften nicht athermische, sondern thermische Effekte, beziehungsweise Fehler bei der künstlichen Bebrütung der Eier für die gefundenen Effekte verantwortlich sein (Thalau 2002). Mit neueren, methodisch robusteren Studien konnten auf molekularer Ebene Nachweise für athermische Effekte von HF-EMF erbracht werden. So fanden etwa Shallom et al. (2002) und Di Carlo et al. (2002), dass HF-EMF (915 MHz) die Produktion des Stressproteins Hsp70 in Zellen von Hühnerembryonen beeinflussen, wobei thermische Effekte als Ursache weitgehend ausgeschlossen werden können (Mild und Mattsson 2010). Pawlak et al. (2018) konnten unter der Einwirkung von HF-EMF (1,80 GHz, 4,23–6,25 V/m) eine Zunahme der Konzentration des Stresshormons Kortikosteron im Plasma sowie eine Abnahme von Fett und Glykogen in der Leber von frisch geschlüpften Hühnern nachweisen. Auf Ebene des Organismus konnten Pawlak et al. (2018) aber keine Effekte auf die Schlupfrate oder die Anzahl von Missbildungen der Hühner feststellen. Auch die Studie von Woelders et al. (2017) erbrachte für Frequenzen von 1,80, 1,88, 2,10 und 5,60 GHz und einer elektrischen Feldstärke von 3 V/m keine Nachweise für eine Schädigung von Hühnerembryonen durch niedrig dosierte HF-EMF.

Freilandstudien: Neben den Studien zur Orientierung von Zugvögeln gibt es nur wenige Arbeiten zum Einfluss von HF-EMF auf Vögel im Freiland. Diese sind zudem qualitativ oft mangelhaft. Am häufigsten wurde untersucht, ob Bruterfolg oder Populationsdichte von Brutvögeln durch HF-EMF negativ beeinflusst werden. Balmori (2005), Balmori und Hallberg (2007) und Everaert und Bauwens (2007) fanden negative Korrelationen zwischen dem Bruterfolg von Weissstörchen beziehungsweise der Populationsdichte von Haussperlingen *Passer domesticus* und der Intensität von Mobilfunkstrahlung (900 MHz und 1800 MHz). Allerdings gibt es eine ganze Reihe von weiteren Faktoren, die Bruterfolg und Populationsdichte von Vögeln beeinflussen, und diese wurden in den genannten Studien nicht untersucht. Es ist zwar eine Tatsache, dass in vielen urbanen Gebieten weltweit die Bestände der Haussperlinge stark abgenommen haben. Als mögliche Gründe stehen aber primär andere Ursachen im Vordergrund, wie der Verlust von Nistplätzen und geeigneter Nahrung zur Jungenaufzucht, Umweltgifte oder die Zunahme von natürlichen Feinden wie Falken (Mohring et al. 2021). In einer Studie von Nath et al. (2022), in der neben HF-EMF weitere Einflussvariablen einbezogen

wurden, konnte kein Effekt von HF-EMF auf die Bestände von Haussperlingen festgestellt werden. In der Schweiz wurde seit dem Aufbau des Mobilfunknetzes kein Rückgang der Haussperlinge beobachtet. Die Bestände nehmen landesweit (Strebel et al. 2024), aber auch im Siedlungsgebiet (Schweizerische Vogelwarte, unveröffentlichte Daten), eher zu.

In den letzten Jahren wurde eine ganze Reihe von Arbeiten publiziert, in denen ein negativer Zusammenhang zwischen der Populationsdichte von Vögeln und dem Ausbau der Mobilfunktechnologie hergestellt wird, z.B. Kler et al. (2018) oder Bhat und Singh (2019). Obwohl viele dieser Arbeiten an Universitäten verfasst wurden, erfüllen sie nicht einmal Minimalstandards für wissenschaftliche Arbeiten (z.B. durch ungenügende Stichprobengrößen, nicht nachvollziehbare und/oder fehlerhafte Methodik, keine oder mangelhafte statistische Auswertungen, Widersprüche zwischen Resultaten und ihrer Interpretation). Trotzdem werden solche Studien in der Diskussion über negative Auswirkungen von EMF auf Flora und Fauna immer wieder zitiert. Bei der Evaluation von Studien muss daher neben den Resultaten immer auch deren Qualität berücksichtigt werden, soweit diese beurteilbar ist (Bodewein et al. 2019). Das gilt selbstverständlich für alle Studien, nicht nur für jene, bei denen negative Einflüsse von NIS auf Vögel beschrieben werden.

Bei kurz (35–100 μ s) gepulsten HF-EMF, wie sie in erster Linie von Radargeräten erzeugt werden, kann ein weiteres, wissenschaftlich nachgewiesenes Phänomen auftreten, das sogenannte Mikrowellenhören (ICNIRP 2020, Lin 2022). Die Wirkung wird durch thermoelastische Wellen verursacht und kann als summandes, klickendes oder knackendes Geräusch wahrgenommen werden. Thermoelastische Wellen sind Druckwellen, die entstehen können, wenn Gewebe durch HF-EMF kurzzeitig und lokal erhitzt wird (Lin 2022). Das Mikrowellenhören wurde bei Menschen und Tieren (Ratten und Katzen) nachgewiesen. Ob es auch bei Vögeln auftritt, ist nicht bekannt.

In drei Arbeiten wurde der Einfluss von Radarstrahlung auf Vögel untersucht. Bruderer et al. (1999) stellten beim Tracking von Vögeln mit einem Radargerät (9 GHz, gepulste Strahlung, elektrische Feldstärken ca. 100–400 V/m, 60 s minimale Verweildauer des Vogels im Radarstrahl) keine Verhaltensänderungen der im Strahl fliegenden Vögel fest, während dies bei einem Lichtstrahl der Fall war. Rejt et al. (2007) verglichen verschiedene brutbiologische Parameter von Meisen mit und ohne Einfluss von Radarstrahlung (1,2–3 GHz, gepulste Strahlung, elektrische Feldstärken ca. 6–43 V/m). Einzig bei der Verteilung der Vogelarten fanden sich Unterschiede. Kohlmeisen brüteten häufiger in Nistkästen mit tieferer Strahlenbelastung als Blaumeisen, bei allen anderen Parametern wie An-

zahl besetzter Nistkästen, Gelegegrösse oder Anzahl geschlüpfter Jungvögel fanden sich keine klaren Unterschiede. Leider wurden auch bei dieser Arbeit keine weiteren Faktoren einbezogen, die die Artverteilung ebenfalls hätten erklären können. Sheridan et al. (2015) untersuchten den Einfluss von stationären und mobilen Radargeräten (9,3 GHz, gepulste Strahlung, elektrische Feldstärken ca. 30–60 V/m) auf das Aufmerksamkeits- und Fluchtverhalten von Kuhstärklingen *Molothrus ater*. Sie fanden mögliche Hinweise auf erhöhte Aufmerksamkeit und früheres Flüchten unter dem Einfluss der Radarstrahlung. Insgesamt sind die Resultate aber auch bei dieser Studie uneinheitlich und schwierig zu interpretieren.

Leider existieren auch für HF-EMF nur sehr wenige qualitativ gute Freilandstudien, in denen neben den HF-EMF weitere mögliche Einflussfaktoren untersucht wurden. Mit dem vorhandenen Wissen ist es daher äusserst schwierig, die Relevanz der im Labor gefundenen nicht-thermischen Effekte für die Situation im Freiland abzuschätzen.

Generell kaum erforscht sind die Auswirkungen von HF-EMF auf Fauna und Flora im Bereich oberhalb von 6 GHz, der in Zukunft vermehrt für Mobilfunk und Satellitenkommunikationssysteme genutzt werden soll. Auf dieses Manko weist auch die beratende Expertinnen- und Expertengruppe nicht-ionisierende Strahlung (BERENIS) des Bundes hin und empfiehlt aufgrund dieser Wissenslücken die «konsequente Anwendung des Vorsorgeprinzips» (BERENIS 2025). Über Vögel gibt es aktuell keine entsprechenden Studien.

3. Zum Schutz der Vögel vor NIS

3.1. Probleme beim Vollzug

Die gesetzlichen Grundlagen für den Schutz von Mensch, Fauna und Flora vor NIS beruhen auf dem Umweltschutzgesetz (USG) und sind für alle drei Gruppen weitgehend identisch (Tab. 1). Im Gegensatz zum Menschen (NISV) gibt es aber für den Vollzug für Flora und Fauna keine Verordnung mit allgemeingültigen Grenzwerten. Stattdessen sieht das USG vor, im Einzelfall zu klären, ob NIS für Tiere oder Pflanzen schädlich oder lästig sind (Tab. 1). Bei dieser Einzelfallbeurteilung gelten aber dieselben materiellen Grundsätze wie für die verordnungsmässige Festsetzung der Immissionsgrenzwerte (BGer 1C_338/2007 E. 4). Würde man dies analog den Berechnungsgrundlagen der NISV (ICNIRP 1998) und gestützt auf die wissenschaftlichen Arbeiten für Vögel tun, so würden wesentlich tiefere Grenzwerte als jene für den Menschen resultieren, da man beim Menschen von einer maximal tolerierbaren Körpererwärmung von 1 °C ausgeht (ICNIRP 2020),

während bei Vogelebryonen schon eine Temperaturerhöhung von mehr als 0,5 °C Schäden bewirken kann (Thalau et al. 2003). Zudem sind Vogelebryonen der Strahlung aus diversen weiteren Gründen stärker ausgesetzt (siehe 2.5.1).

Während die Grenzwerte der NISV bei jeder Inbetriebnahme einer ortsfesten Anlage automatisch geprüft und eingehalten werden müssen, fehlt für Flora und Fauna ein entsprechender Automatismus, da keine Verordnung mit allgemeingültigen Grenzwerten existiert (Tab. 1). Dies hat in der Praxis zur Folge, dass der im USG verankerte Schutz weitgehend vernachlässigt wird. Weder im Standortdatenblatt, das von der Bauherrschaft einer ortsfesten Anlage zusammen mit dem Baugesuch eingereicht werden muss, noch in den vom Bund publizierten Vollzugshilfen wird der Schutz von Flora und Fauna erwähnt. Wird der Vogelschutz im Verlauf eines Bewilligungsverfahrens überhaupt zum Thema, so geschieht dies nicht systematisch, sondern in der Regel erst als Reaktion auf Einsprachen. Auch die kantonalen Naturschutzbehörden werden häufig erst im Verlauf von Einspracheverfahren in den Bewilligungsprozess einbezogen.

In den Einspracheverfahren wird zwar durchwegs anerkannt, dass mangels fehlender Regelungen Einzelfallbeurteilungen durchzuführen sind (z.B. BGer 1C_338/2007, BGer 1C_579/2017); diese beschränken sich aber in der Regel darauf, die Argumente der Einsprechenden zu widerlegen, anstatt den Sachverhalt umfassend zu prüfen. Leider wird dabei oftmals nicht wissenschaftlich argumentiert. Viele Beschwerden wurden mit der Begründung abgewiesen, es seien «keine» (BGer 1C_579/2017) oder «kaum» (BGer 1C_338/2007) wissenschaftliche Arbeiten zum Thema bekannt. Selbst wissenschaftlich unbestrittene Tatsachen, wie die besondere Verletzlichkeit von Vögeln während der Embryonalentwicklung (BGer 1C_579/2017) oder die Schädlichkeit thermischer Effekte, werden in Abrede gestellt, obwohl diese thermischen Effekte unbestritten sind und den Immissionsgrenzwerte der NISV zugrunde liegen. So findet sich etwa auf einer von den Bundesbehörden betriebenen Internetseite (www.5g-info.ch, aufgerufen am 2. April 2025) die Behauptung «bisher konnten schädliche Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung auf Tiere und Pflanzen bei Intensitäten, wie sie in der Umwelt vorkommen können, nicht nachgewiesen werden». Mit diesem Satz, der im Widerspruch zu den nachgewiesenermassen schädlichen Auswirkungen thermischer Effekte steht, wurde bereits in Urteilen auf kantonomer Ebene argumentiert (BVD 110/2022/157, BVD 110/2023/75).

Der Erlass einer Verordnung für Tiere und Pflanzen analog der NISV wurde 1999 durch den Bundesrat «mangels wissenschaftlicher Grundlagen» abgelehnt

Tab. 1. Trotz identischer gesetzlicher Grundlagen werden die Bestimmungen des USG bei Tieren und Pflanzen kaum vollzogen, da allgemeingültige Regeln für die Umsetzung fehlen.
Despite identical legal foundations, the provisions of the USG are rarely enforced in relation to animals and plants, as there are no universally applicable rules for implementation.

	Mensch	Tiere und Pflanzen
Gesetz	Art. 1 USG: « ¹ Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens, dauerhaft erhalten. ² Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen»	
Verordnung	NISV: Immissionsgrenzwerte (Schutz vor anerkannten Auswirkungen) und Anlagegrenzwerte (Schutz vor möglichen Auswirkungen, «Vorsorgegrenzwerte»)	Keine Verordnung, keine Grenzwerte. Stattdessen Einzelfallprüfungen gemäss Art. 14 lit. a USG: «Die Immissionsgrenzwerte für Luftverunreinigungen sind so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährden»
Vorschriften	Bewilligungsverfahren, Standortdatenblätter, Vollzugsempfehlungen, Messvorschriften	keine Ausführungsvorschriften
Ausführung	standardisierte Umsetzung für alle ortsfesten Anlagen, Kontrolle durch kommunale und kantonale Behörden (Bauämter, NIS-Fachstellen) und Bundesbehörden	keine Automatismen, erst als Reaktion auf Einsprachen, keine seriösen Einzelfallprüfungen, fehlendes Fachwissen, unklare Zuständigkeiten

(BGer 1C_338/2007 E. 3). Diese Begründung ist schwer nachvollziehbar, da selbst die Grenzwerte für den Menschen zu einem grossen Teil auf Studien an Tiermodellen beruhen (Thalau 2002, ICNIRP 2020); dies nicht zuletzt deshalb, weil experimentelle Forschung am Menschen aus ethischen Gründen in den meisten Fällen nicht möglich ist (Thalau 2002). In Wahrheit bestehen zumindest für den Einfluss von NIS auf Tiere wohl die robusteren wissenschaftlichen Grundlagen als für den Menschen. Soll der im USG verankerte Schutz von Tieren und Pflanzen wirklich umgesetzt werden, so braucht es dazu allgemeingültige Regeln und Grenzwerte (Froidevaux et al. 2024, Recuero Virto et al. 2024). Selbst im Rahmen einer vom USG geforderten Einzelfallbeurteilung müssen Grenzwerte definiert werden, denn ohne solche Grenzwerte kann kaum beurteilt werden, ab welcher Strahlenbelastung Tiere und Pflanzen geschädigt werden.

Die aktuelle Rechtsprechung in der Schweiz zum Einfluss von NIS auf Pflanzen und Tiere anerkennt die Schädlichkeit von NIS höchstens dann, wenn sie wissenschaftlich zweifelsfrei nachgewiesen ist. Bestehen Zweifel an einem wissenschaftlichen Nachweis, wird zugunsten der Geschädigten entschieden (BGer 1C_579/2017, BGer 1C_579/2017, BGer 1C_579/2017). Diese Praxis widerspricht dem Vorsorgeprinzip im USG, das verlangt, dass Einwirkungen,

die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen sind (Art. 1 Abs. 2 USG). Auch ein Gutachten zur Bedeutung des Vorsorgeprinzips im Auftrag des BAFU kommt zu diesem Schluss: Das Vorsorgeprinzip bedingt «keinen wissenschaftlichen Nachweis künftiger Schädlichkeit oder Lästigkeit». Für seine Anwendung reichen «erste wissenschaftliche Hinweise einer möglichen Gefährdung, eine plausible Risikohypothese oder ein begründeter Verdacht» (Thurnherr 2020).

3.2. Empfehlungen für den Vollzug

Die vorliegende Übersicht über die wissenschaftliche Literatur macht deutlich, dass es durchaus Evidenz zum Einfluss von NIS auf Vögel gibt. Dies gilt insbesondere für die thermischen Effekte. Gestützt auf diese wissenschaftlichen Arbeiten empfiehlt die Schweizerische Vogelwarte zum Schutz der Vögel vor NIS mindestens die Einhaltung der in der NISV definierten Grenzwerte. Für Vögel im freien Luftraum lässt sich dies freilich nicht umsetzen, da freifliegende Vögel keine Minimalabstände zu NIS-Quellen einhalten. Die Schweizerische Vogelwarte empfiehlt jedoch, dass bei Anlagen, die in der Nähe von bestehenden Brutstandorten installiert werden, der Vorsorgegrenzwert der NISV (Anlagegrenzwert) eingehalten wird, denn Vogelembryonen sind durch NIS besonders gefährdet und können sich

der Strahlung während der gesamten Brut- und Nestlingsphase nicht entziehen. Brutstandorte sollten analog der NISV als «Orte mit empfindlicher Nutzung» bezeichnet werden, für die das im USG festgeschriebene Vorsorgeprinzip zur Anwendung kommt. Ähnliche Massnahmen werden auch in einer Studie im Auftrag des Europäischen Parlaments empfohlen (European Parliament 2021).

Die Forderung nach Grenzwerten unterhalb des Immissionsgrenzwertes an Brutplätzen von Vögeln wurde von den Gerichten bisher abgelehnt. Begründet wurde dies damit, dass es nicht zulässig sei, für Vögel tiefere Grenzwerte zu fordern als für den Menschen (z.B. BGer 1C_579/2017, BGer 1C_450_2010, WBE.2020.34). Aus Sicht der Schweizerischen Vogelwarte ist diese Argumentation nicht stichhaltig, denn bei den fraglichen Brutplätzen handelte es sich um Gebäude, die vom Menschen nicht permanent bewohnt wurden, und somit gilt für diese dort der Immissionsgrenzwert und nicht der strengere Anlagegrenzwert. Würde man die NISV auch auf Vögel anwenden, so würde in Gebäuden mit Niststandorten für die brütenden Vögel aber der Anlagegrenzwert gelten, denn Brutstandorte sind zweifellos «Orte mit empfindlicher Nutzung». Der vermeintlich tiefere Grenzwert für Vögel kam in den oben erwähnten Fällen also nur dadurch zu Stande, dass sich die Vögel in diesen Gebäuden permanent aufhalten, Menschen jedoch nicht. Würden sich die Menschen dort ebenfalls permanent aufhalten, würde auch für sie der strengere Anlagegrenzwert gelten.

Um den im USG formulierten Schutz von Pflanzen und Tieren vor NIS umzusetzen, braucht es aus Sicht der Schweizerischen Vogelwarte in Zukunft allgemeingültige Regeln und Grenzwerte, analog der NISV zum Schutz des Menschen. In Ermangelung solcher Regeln kann die vorliegende Übersichtsarbeit NIS-Fachstellen, Baubehörden, Jagd- und Fischereiverwaltungen, Naturschutzfachstellen und weitere Dienststellen unterstützen. Die Schweizerische Vogelwarte möchte die zuständigen Behörden ermuntern, das hier zusammengefasste Wissen bei der Beurteilung von Baugesuchen zu Rate zu ziehen und dem Schutz der Vögel konsequent Rechnung zu tragen.

Dank

Mein herzlicher Dank gilt folgenden Personen, die frühere Versionen des Manuskripts kritisch durchgelesen und kommentiert haben: Lukas Berger, Pierre Bize, Reto Burri, Barbara Helm, Gilberto Pasinelli und Therese Plüss. Meike Mevissen und David Schürmann haben mit ihren Gutachten und Kommentaren wertvolle Hinweise zur Verbesserung des Beitrags gegeben, wofür ihnen ein besonderer Dank gebührt.

Abstract

Bächler E (2025) Impact of non-ionising radiation (NIS) on birds: legal situation, current scientific knowledge and recommendations for the protection of birds. Ornithologischer Beobachter 122: 352–368.

At close range, non-ionising radiation (NIR) can heat and damage body tissues of birds, especially embryos and nestlings. This thermal effect of NIR is scientifically undisputed, and birds must be protected from it in accordance with current legislation. Due to the spatial proximity, the installation of transmitters in buildings used by birds as nesting sites is particularly sensitive.

There is also clear scientific evidence for the influence of low-dose electromagnetic radiation up to about 100 MHz on the magnetic compass of birds. However, it is not possible to conclusively assess the extent to which the orientation ability of migratory birds is impaired by such sources of disturbance; it is not known how widespread such sources of interference are and up to what distance there is an effect, and birds can also use other orientation systems in addition to the magnetic compass.

Under controlled laboratory conditions, it could be demonstrated almost consistently that both high-frequency radiation and low-frequency magnetic fields increase oxidative stress even in the low-dose range. The evidence on the influence of low-frequency magnetic fields on the formation of stress hormones and proteins or the melatonin balance of birds is also clear. Certain genotypes also had more embryonic malformations and increased embryonic mortality. For high-frequency electromagnetic radiation, these effects are somewhat less clear.

It is difficult to assess whether and to what extent non-thermal effects of NIR found in the laboratory also affect birds under natural living conditions. On the one hand, organisms can compensate for negative effects of NIR, such as oxidative stress, to a certain extent, but this ability is limited in younger, older or otherwise weakened individuals. On the other hand, damage such as embryonic malformations often have multifactorial causes, for example a combination of genetic predisposition and environmental factors, and the impact of NIR is usually only one of many influences. There are considerable gaps in knowledge that should be addressed by research.

There is currently insufficient scientific evidence for other effects of NIR, such as avoidance behaviour or influences on population densities. Even in occasional cases of mass bird deaths, no evidence of the effect of NIR has been found so far.

Flora and fauna, including birds, must be protected from negative effects of NIR, in accordance with current environmental legislation. However, since no corresponding implementing regulations have been issued for flora and fauna, their protection is only carried out in an extremely incomplete way. For the systematic implementation of the legally enshrined protection of birds from NIR, the formulation of generally applicable rules and limit values is therefore indispensable. The Swiss Ornithological Institute recommends that the provisions of the NISV (ordinance on protection from non-ionizing radiation) also be applied to birds and that the precautionary principle be taken into account, especially for breeding sites.

Literatur

- Alerstam T (1987) Bird migration across a strong magnetic anomaly. *Journal of Experimental Biology* 130: 63–86.
- Balmori A (2005) Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of White Stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagnetic Biology and Medicine* 24: 109–119.
- Balmori A, Hallberg O (2007) The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): a possible link with electromagnetic radiation. *Electromagnetic Biology and Medicine* 26: 141–151.
- Beason RC, Wiltschko R, Wiltschko W (1997) Pigeon homing: effects of magnetic pulses on initial orientation. *The Auk* 114: 405–415.
- BERENIS (2025) Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 5.8–200 GHz – Biologische Effekte und Konsequenzen für die Gesundheit. Newsletter-Sonderausgabe Mai 2025. URL https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektromog/fachinfo-daten/newsletter_berenis_sonderausgabe_mai_2025.pdf.download.pdf/Newsletter_BERENIS_Sonderausgabe_Mai_2025_DE.pdf, Stand 27. August 2025.
- Berman E, Chacon L, House D, Koch BA, Koch WE, Leal J, Lovtrup S, Mantiply E, Martin AH, Martucci GI (1990) Development of chicken embryos in a pulsed magnetic field. *Bioelectromagnetics* 11: 169–187.
- Bhat T, Singh R (2019) Effect of mobile tower radiation on avian fauna: a case study of Lolab Valley, Kupwara Jammu and Kashmir. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* 6: 570–576.
- Bianco G, Ilieva M, Åkesson S (2019) Magnetic storms disrupt nocturnal migratory activity in songbirds. *Biology Letters* 15: 20180918.
- Bodewein L, Schmiedchen K, Dechent D, Stunder D, Graefrath D, Winter L, Kraus T, Driessen S (2019) Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz). *Environmental Research* 171: 247–259.
- Brent RL (1999) Reproductive and teratologic effects of low-frequency electromagnetic fields: A review of in vivo and in vitro studies using animal models. *Teratology* 59: 261–286.
- Brown AFA (1988) Kunstbrut: Handbuch für Züchter. Schaper, Alfeld.
- Bruderer B, Peter D, Steuri T (1999) Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology* 202 (Pt 9): 1015–1022.
- Burlaka A, Tsybulin O, Sidorik E, Lukin S, Polishuk V, Tsehmistrenko S, Yakymenko I (2013) Overproduction of free radical species in embryonal cells exposed to low intensity radiofrequency radiation. *Experimental Oncology* 35: 219–225.
- Che Y, Sun H, Cui Y, Zhou D, Ma Y (2007) Effects of exposure to 50 Hz magnetic field of 1 mT on the performance of detour learning task by chicks. *Brain Research Bulletin* 74: 178–182.
- Cochran WW, Mouritsen H, Wikelski M (2004) Migrating songbirds recalibrate their magnetic compass daily from twilight cues. *Science* 304: 405–408.
- Costantini D, Casagrande S, Dell’Omo G (2007) MF magnitude does not affect body condition, pro-oxidants and anti-oxidants in Eurasian kestrel (*Falco tinnunculus*) nestlings. *Environmental Research* 104: 361–366.
- Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburg WJGM, Bolte JFB, Snoo GR de (2013) A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International* 51: 116–140.
- Dell’Omo G, Costantini D, Lucini V, Antonucci G, Nonno R, Polichetti A (2009) Magnetic fields produced by power lines do not affect growth, serum melatonin, leukocytes and fledging success in wild kestrels. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 150: 372–376.
- Di Carlo A, White N, Guo F, Garrett P, Litovitz T (2002) Chronic electromagnetic field exposure decreases HSP70 levels and lowers cytoprotection. *Journal of Cellular Biochemistry* 84: 447–454.
- Di Carlo AL, Litovitz TA (1999) Is genetics the unrecognized confounding factor in bioelectromagnetics? Flock-dependence of field-induced anoxia protection in chick embryos. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 48: 209–215.
- Doherty PF, Grubb TC (1998) Reproductive success of cavity-nesting birds breeding under high-voltage powerlines. *The American Midland Naturalist* 140: 122–128.
- Driessen S, Bodewein L, Dechent D, Graefrath D, Schmiedchen K, Stunder D, Kraus T, Petri A-K (2020) Biological and health-related effects of weak static magnetic fields (≤ 1 mT) in humans and vertebrates: a systematic review. *PloS One* 15: e0230038.
- DuRant SE, Hopkins WA, Hepp GR, Walters JR (2013) Ecological, evolutionary, and conservation implications of incubation temperature-dependent phenotypes in birds. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 88: 499–509.
- Durfee WK, Plante PR, Muthukrishnan S (1975) Extremely lowfrequency electric and magnetic fields in domestic birds. Part I. The influence of ELF, magnetic and electric fields upon hatchability and early development of chicks. Technical report, University of Rhode Island, Kingston Rhode Island (Departments Animal Science, Electrical Engineering & Animal Pathology).
- Engels S, Schneider N-L, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, Elbers D, Kittel A, Hore PJ, Mouritsen H (2014) Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature* 509: 353–356.

- European Parliament (2021) Environmental impacts of 5G: a literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants. Brüssel.
- Everaert J, Bauwens D (2007) A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). Electromagnetic Biology and Medicine 26: 63–72.
- Farrell JM, Litovitz TL, Penafiel M, Montrose CJ, Doinov P, Barber M, Brown KM, Litovitz TA (1997) The effect of pulsed and sinusoidal magnetic fields on the morphology of developing chick embryos. Bioelectromagnetics 18: 431–438.
- Fernie KJ, Leonard NJ, Bird DM (2000) Behavior of free-ranging and captive American kestrels under electromagnetic fields. Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A 59: 597–603.
- Fernie KJ, Reynolds SJ (2005) The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: a review. Journal of Toxicology and Environmental Health. Part B, Critical Reviews 8: 127–140.
- Froidevaux JSP, Recuero Virto L, Czerwiński M, Thielens A, Park KJ (2024) Addressing wildlife exposure to radio-frequency electromagnetic fields: time for action. Environmental Science & Technology Letters 11: 3–4.
- Gilmer DS, Wiehe JM (1977) Nesting by ferruginous hawks and other raptors on high voltage powerline towers. Prairie Naturalist 9: 1–10.
- Griffith SC, Mainwaring MC, Sorato E, Beckmann C (2016) High atmospheric temperatures and 'ambient incubation' drive embryonic development and lead to earlier hatching in a passerine bird. Royal Society Open Science 3: 150371.
- Gulson-Castillo ER, van Doren BM, Bui MX, Horton KG, Li J, Moldwin MB, Shedden K, Welling DT, Winger BM (2023) Space weather disrupts nocturnal bird migration. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 120: e2306317120.
- Gupta V, Srivastava R (2022) 2.45 GHz microwave radiation induced oxidative stress: role of inflammatory cytokines in regulating male fertility through estrogen receptor alpha in *Gallus gallus domesticus*. Biochemical and Biophysical Research Communications 629: 61–70.
- Hamann HJ, Schmidt KH, Wiltshko W (1998) Mögliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf die Brutbiologie von Vögeln am Beispiel einer Population von höhlenbrütenden Singvögeln an einer Stromtrasse. Vogel und Umwelt: Zeitschrift für Vogelkunde und Naturschutz in Hessen 9: 215–246.
- Hanowski JM, Niemi GG, Blake JG (1996) Response of Breeding and Migrating Birds to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. Ecological Applications 6: 910–919.
- Helm B, Liedvogel M (2024) Avian migration clocks in a changing world. Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology 210: 691–716.
- Heynick LN, Merritt JH (2003) Radiofrequency fields and teratogenesis. Bioelectromagnetics Supplement 6: S174–S186.
- Holland RA, Helm B (2013) A strong magnetic pulse affects the precision of departure direction of naturally migrating adult but not juvenile birds. Journal of the Royal Society, Interface 10: 20121047.
- ICNIRP (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74: 494–522.
- ICNIRP (2010) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics 99: 818–836.
- ICNIRP (2020) Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics 118: 483–524.
- Juutilainen J (2005) Developmental effects of electromagnetic fields. Bioelectromagnetics Supplement 7: S107–S115.
- Juutilainen J, Herrala M, Luukkonen J, Naarala J, Hore PJ (2018) Magnetocarcinogenesis: is there a mechanism for carcinogenic effects of weak magnetic fields? Proceedings Biological Sciences 285: 20180590.
- Juutilainen J, Saali K (1986) Development of chick embryos in 1 Hz to 100 kHz magnetic fields. Radiation and Environmental Biophysics 25: 135–140.
- Karipidis K, Brzozek C, Mate R, Bhatt CR, Loughran S, Wood AW (2023) What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: a systematic map. Environmental Evidence 12: 9.
- Karki N, Vergish S, Zoltowski BD (2021) Cryptochromes: photochemical and structural insight into magneto-reception. Protein Science 30: 1521–1534.
- Kler TK, Kumar M, Vashishat N (2018) Effects of electromagnetic radiations on diversity and breeding biology of birds living near power lines and mobile towers at Ludhiana, Punjab. Journal of Environmental Biology 39: 247–252.
- Krueger WF, Giarola AJ, Bradley JW, Shrekenhamer A (1975) Effects of electromagnetic fields on fecundity in the chicken. Annals of the New York Academy of Sciences 247: 391–400.
- Landler L, Keays DA (2018) Cryptochrome: The magneto-sensor with a sinister side? PLoS Biology 16: e3000018.
- Leberecht B, Kobylkov D, Karwinkel T, Döge S, Burnus L, Wong SY, Apte S, Haase K, Musielak I, Chetverikova R, Dautaj G, Bassetto M, Winklhofer M, Hore PJ, Mouritsen H (2022) Broadband 75–85 MHz radiofrequency fields disrupt magnetic compass orientation in night-migratory songbirds consistent with a flavin-based radical pair magnetoreceptor. Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology 208: 97–106.
- Leberecht B, Wong SY, Satish B, Döge S, Hindman J, Venkatraman L, Apte S, Haase K, Musielak I, Dautaj G, Solov'yov IA, Winklhofer M, Mouritsen H, Hore PJ (2023) Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 120: e2301153120.
- Lin JC (2022) The microwave auditory effect. IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology 6: 16–28.
- Lintzen T, Boese G, Müller M, Eichmeier J, Ruhenstroth-Bauer G (1989) The stability of the circadian rhythm of green finches (*Carduelis chloris*) under the influence of a weak electrical field. Journal of Biological Rhythms 4: 371–376.
- Lis M (2019) Effect of 50 Hz magnetic field on chicken embryo development and course of hatching. Science, Technology and Innovation 5: 44–49.

- Mevissen M, Schürmann D (2021) Gibt es Hinweise auf vermehrten oxidativen Stress durch elektromagnetische Felder?: Eine Zusammenfassung neuerer relevanter Tier- und Zellstudien in Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen. Universitäten Bern und Basel. URL <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=67593>, Stand 24. Januar 2025.
- Mild KH, Mattsson M-O (2010) ELF noise fields: a review. *Electromagnetic Biology and Medicine* 29: 72–97.
- Mohring B, Henry P-Y, Jiguet F, Malher F, Angelier F (2021) Investigating temporal and spatial correlates of the sharp decline of an urban exploiter bird in a large European city. *Urban Ecosystems* 24: 501–513.
- Monaghan P (2014) Organismal stress, telomeres and life histories. *Journal of Experimental Biology* 217: 57–66.
- Mouritsen H (2018) Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature* 558: 50–59.
- Muheim R, Moore FR, Phillips JB (2006) Calibration of magnetic and celestial compass cues in migratory birds – a review of cue-conflict experiments. *Journal of Experimental Biology* 209: 2–17.
- Muheim R, Phillips JB (2023) Effects of low-level RF fields reveal complex pattern of magnetic input to the avian magnetic compass. *Scientific Reports* 13: 19970.
- Nath A, Singha H, Lahkar BP (2022) Correlation does not imply causation: decline of house sparrow overshadowed by electromagnetic radiation. *Urban Ecosystems* 25: 1279–1295.
- Niemi GJ, Hanowski JM (1984) Effects of a transmission line on bird populations in the Red Lake Peatland, Northern Minnesota. *The Auk* 101: 487–498.
- Nishimura I, Imai S, Negishi T (2009) Lack of chick embryotoxicity after 20 kHz, 1.1 mT magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 30: 573–582.
- Nishimura I, Tanaka K, Negishi T (2013) Intermediate frequency magnetic field and chick embryotoxicity. *Congenital Anomalies* 53: 115–121.
- Packmor F, Kishkinev D, Bittermann F, Kofler B, Machowetz C, Zechmeister T, Zawadzki LC, Guilford T, Holland RA (2021) A magnet attached to the forehead disrupts magnetic compass orientation in a migratory songbird. *Journal of Experimental Biology* 224: jeb243337.
- Pawlak K, Nieckarz Z, Sechman A, Wojtysiak D, Bojarski B, Tombarkiewicz B (2018) Effect of a 1800 MHz electromagnetic field emitted during embryogenesis on chick development and hatchability. *Anatomia, Histologia, Embryologia* 47: 222–230.
- Pawlak K, Sechman A, Nieckarz Z, Wojtysiak D (2013) Effect of weak electromagnetic field on cardiac work, concentration of thyroid hormones and blood aminotransferase level in the chick embryo. *Acta Veterinaria Hungarica* 61: 383–392.
- Peterka M, Peterková R, Likovský Z (1996) Teratogenic and lethal effects of long-term hyperthermia and hypothermia in the chick embryo. *Reproductive Toxicology* 10: 327–332.
- Petri A-K, Schmiedchen K, Stunder D, Dechent D, Kraus T, Bailey WH, Driessen S (2017) Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: a systematic review. *Environmental Health* 16: 41.
- Pophof B, Henschenmacher B, Kattinig DR, Kuhne J, Vian A, Ziegelberger G (2023) Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields above 100 MHz on fauna and flora: workshop report. *Health Physics* 124: 31–38.
- Pourlis AF (2009) Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology* 16: 179–189.
- Rajendra P, Sujatha HN, Devendranath D, Gunasekaran B, Sashidhar RB, Subramanyam C, Channakeshava (2004) Biological effects of power frequency magnetic fields: neurochemical and toxicological changes in developing chick embryos. *Biomagnetic Research and Technology* 2: 1.
- Recuero Virto L, Thielens A, Czerwiński M, Froidevaux J (2024) The exposure of nonhuman living organisms to mobile communication emissions: a survey to establish European stakeholders' policy option preferences. *Risk Analysis* 44 (11): 2554–2568.
- Rejt L, Mazgajski T, Kubacki R, Kieliszek J, Sobiczewska E, Szmigielski S (2007) Influence of radar radiation on breeding biology of tits (*Parus* sp.). *Electromagnetic Biology and Medicine* 26: 235–238.
- Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W (2004) Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429: 177–180.
- Roda O, Garzón I, Carriel V, Alaminos M, Sánchez-Montesinos I (2011) Biological effects of low-frequency pulsed magnetic fields on the embryonic central nervous system development. A histological and histochemical study. *Histology and Histopathology* 26: 873–881.
- Sakraoui D, Ziane N, Ghalem R, Boukheroufa M, Habbachi W (2024) Is there an effect of electromagnetic waves from base stations on the breeding success of *Ciconia ciconia ciconia* in Algeria? *Biosystems Diversity* 31: 493–499.
- Schneider T, Thalau HP, Semm P (1994a) Effects of light or different earth-strength magnetic fields on the nocturnal melatonin concentration in a migratory bird. *Neuroscience Letters* 168: 73–75.
- Schneider T, Thalau HP, Semm P, Wiltschko W (1994b) Melatonin is crucial for the migratory orientation of Pied Flycatchers (*Ficedula hypoleuca pallas*). *Journal of Experimental Biology* 194: 255–262.
- Schwarze S, Schneider N-L, Reichl T, Dreyer D, Lefeldt N, Engels S, Baker N, Hore PJ, Mouritsen H (2016) Weak broadband electromagnetic fields are more disruptive to magnetic compass orientation in a night-migratory songbird (*Erithacus rubecula*) than strong narrow-band fields. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 10: 55.
- Semm P (1992) Pineal function in mammals and birds is altered by earth-strength magnetic fields. Seite 53–62 in: Moore-Ede MC, Campbell SS, Reiter RJ (Herausgeber): *Electromagnetic fields and Circadian rhythmicity*. Birkhäuser Boston, Boston, MA.
- Shafey TM, Al-Mufarej S, Al-Batshan HA (2006) Effect of electric field during incubation of eggs on the immune responses of hatched chickens. *Electromagnetic Biology and Medicine* 25: 163–175.
- Shallom JM, Di Carlo AL, Ko D, Penafiel LM, Nakai A, Litovitz TA (2002) Microwave exposure induces Hsp70 and confers protection against hypoxia in chick embryos. *Journal of Cellular Biochemistry* 86: 490–496.

- Sheridan E, Randolet J, DeVault TL, Seamans TW, Blackwell BF, Fernández-Juricic E (2015) The effects of radar on avian behavior: implications for wildlife management at airports. *Applied Animal Behaviour Science* 171: 241–252.
- Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut L-D, Niessner C, Rouyer F, Klarsfeld A, Doulazmi M, Witzak J, d'Harlingue A, Mariani J, Mclure I, Martino CF, Ahmad M (2018) Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. *PLoS Biology* 16: e2006229.
- Strebel N, Antoniazza S, Auchli N, Birrer S, Bühler R, Sattler T, Volet B, Wechsler S, Moosmann M (2024) Zustand der Vogelwelt in der Schweiz. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
- Sun H, Che Y, Liu X, Zhou D, Miao Y, Ma Y (2010) Effects of prenatal exposure to a 50-Hz magnetic field on one-trial passive avoidance learning in 1-day-old chicks. *Bioelectromagnetics* 31: 150–155.
- Thalau HP (2002) Embryonalentwicklung unter dem Einfluss hoch- und niederfrequenter Felder: eine Bestandsaufnahme teratologischer Studien. *Edition Wissenschaft* 17: 3–77.
- Thalau HP, Raczek J, Marx B, Hombach V, Cooper J (2003) Temperature changes in chicken embryos exposed to a continuous-wave 1.25 GHz radiofrequency electromagnetic field. *Radiation Research* 159: 685–692.
- Thurnherr D (2020) Vorsorgeprinzip – Verpflichtungen und Grenzen für die Verwaltung und weitere staatliche Akteure: Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Basel. URL https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/recht/rechtsgutachten/Gutachten_Vorsorgeprinzip_2020_05_06.pdf.download.pdf/Gutachten_Vorsorgeprinzip_2020_05_06.pdf, Stand 24. Januar 2025.
- Tomás G, Barba E, Merino S, Martínez J (2012) Clutch size and egg volume in great tits (*Parus major*) increase under low intensity electromagnetic fields: a long-term field study. *Environmental Research* 118: 40–46.
- Tonelli BA, Youngflesh C, Tingley MW (2023) Geomagnetic disturbance associated with increased vagrancy in migratory landbirds. *Scientific Reports* 13: 414.
- Veicsteinas A, Belleri M, Cinquetti A, Parolini S, Barbato G, Tosatti MM (1996) Development of chicken embryos exposed to an intermittent horizontal sinusoidal 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics* 17: 411–424.
- Webb DR (1987) Thermal tolerance of avian embryos: a review. *The Condor* 89: 874.
- WHO (2006) Static fields. *Environmental Health Criteria Monograph* 232. World Health Organization, Genf.
- Wiltshko R, Wiltshko W (2003) Orientation behavior of homing pigeons at the Gernsheim anomaly. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 54: 562–572.
- Wiltshko W (1968) Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Zeitschrift für Tierpsychologie* 25: 537–558.
- Wiltshko W, Freire R, Munro U, Ritz T, Rogers L, Thalau P, Wiltshko R (2007) The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. *Journal of Experimental Biology* 210: 2300–2310.
- Wiltshko W, Munro U, Wiltshko R, Kirschvink JL (2002) Magnetite-based magnetoreception in birds: the effect of a biasing field and a pulse on migratory behavior. *Journal of Experimental Biology* 205: 3031–3037.
- Wiltshko W, Wiltshko R (1996) Magnetic orientation in birds. *Journal of Experimental Biology* 199: 29–38.
- Woelders H, de Wit A, Lourens A, Stockhofe N, Engel B, Hulsege I, Schokker D, van Heijningen P, Vossen S, Bekers D, Zwamborn P (2017) Study of potential health effects of electromagnetic fields of telephony and Wi-Fi, using chicken embryo development as animal model. *Bioelectromagnetics* 38: 186–203.
- Yakymenko I, Burlaka A, Tsybulin I, Brieieva I, Buchynska L, Tsehmistrenko I, Chekhun F (2018) Oxidative and mutagenic effects of low intensity GSM 1800 MHz microwave radiation. *Experimental Oncology* 40: 282–287.
- Zadeh-Haghighi H, Simon C (2022) Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *Journal of the Royal Society, Interface* 19: 20220325.

Manuskript eingegangen am 14. April 2025

Autor

Erich Bächler ist Biologe und diplomierter Techniker HF Elektrotechnik. Er arbeitet seit 2002 an der Schweizerischen Vogelwarte, zuerst als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Vogelzug, aktuell als Ressortleiter Elektronik. Er beschäftigt sich seit mehr als 20 Jahren mit der Thematik Vögel und NIS.

Erich Bächler, Schweizerische Vogelwarte, Seerose 1, CH-6204 Sempach, E-Mail erich.baechler@vogelwarte.ch