

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds” by Leberecht et al. in PNAS (2023)

Kategorie [Theorie und molekulare Wirkmechanismen]

Spotlight - Mai/2024 no.1 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Viele Zugvögelarten benutzen eine Art Magnetkompass, um sich auf ihrer Reise über Tausende von Kilometern entlang des Magnetfeldes (MF) der Erde zu orientieren. Der prominenteste Kandidat zur Erklärung dieses magnetischen Sinns ist der Radikal-Paar-Mechanismus (RPM) [2-5], bei dem zwei Elektronen in einem Radikal-Paar ein gemeinsames Quantensystem bilden, dessen Zustand magnetisch sensitiv ist. Aus früheren Experimenten ist bekannt, dass der Magnetkompass einiger Zugvögel durch hochfrequente (HF) MF gestört werden kann [6,7]. Die vorliegende Arbeit [1] nutzt diesen Umstand, um Einblicke in die molekulare Struktur der am RPM beteiligten Radikale zu gewinnen. Für den Strahlenschutz ist der RPM konzeptionell interessant, da er ein biophysikalisches Modell liefert, dass die Wechselwirkung relativ schwacher Magnetfelder mit chemischen Reaktionen beschreibt.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive der Autoren

Den Autoren zufolge besteht der wahrscheinlichste Kandidat für ein Radikalpaar (RP) im Magnetkompass des Vogels aus einem lichtaktivierten Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD) und einem protonierten Tryptophan (TrpH). Das RP wird mit $[FAD\bullet^- - TrpH\bullet^+]$ bezeichnet. Die Hyperfeinstruktur – d. h. die Spinenergien der an die umgebenden Kerne gekoppelten Elektronen – bestimmt die Resonanzfrequenzen, bei denen ein externes HF-MF die Magnetosensitivität des RPs stören kann. Insbesondere bestimmt die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Energiewert eine maximale Frequenz (Grenzfrequenz), oberhalb derer keine Störung des Kompasses auftreten sollte. Die Grenzfrequenz hängt von der Struktur des Radikals ab, z. B. ob das TrpH oder ein anderes Radikal mit dem FAD einhergeht. Um die Hypothese zu unterstützen, dass $[FAD\bullet^- - TrpH\bullet^+]$ das beteiligte Radikal-Paar ist, führten die Autoren Verhaltenstests mit Mönchsgrasmücken (*Sylvia atricapilla*) durch, die einer breitbandigen HF-MF-Exposition bei Frequenzen

zwischen 240 ± 5 MHz (etwas über der vorhergesagten maximalen Grenzfrequenz) und 145 ± 5 MHz (etwas über der vorhergesagten niedrigsten Grenzfrequenz) ausgesetzt waren. Der Effektivwert und die Spitzenfeldstärken wurden wie in [7] gewählt, wo die Störung des Magnetkompasses bei Frequenzen zwischen 75 und 85 MHz beobachtet wurde. In beiden Fällen wurden die Vögel unter normalen geomagnetischen Feldbedingungen und mit einem um 120° horizontal gedrehten statischen MF getestet. Sowohl die HF-MF-exponierten Gruppen als auch die Kontrollgruppen orientierten sich an den vorgegebenen statischen MF-Richtungen und es wurde keine Störung des magnetischen Kompasses beobachtet. Die Autoren schließen daraus, dass die Grenzfrequenz für diese Art sogar unterhalb der niedrigsten vorhergesagten Frequenz von 140 MHz liegt.

Um Informationen über die Struktur der beteiligten RP zu erhalten, wurde die experimentelle Studie durch einen numerischen Teil ergänzt. Die Autoren nutzten die Hyperfeinstruktur mehrerer RP, um die Wahrscheinlichkeit von Resonanzeffekten, die durch externe HF-MF ausgelöst werden, als Funktion der Frequenz zu berechnen. In Wirkungsspektrums-Histogrammen (Diagrammen, in denen die Wahrscheinlichkeit für einen Resonanzeffekt gegen die Frequenz aufgetragen wird), wird die Grenzfrequenz deutlich sichtbar und kann mit experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Um einen für die verwendete Rechnerarchitektur angemessenen Rechenaufwand zu erhalten, haben die Autoren Modelle mit einer geringeren Anzahl von Kernen in der Umgebung des RP verwendet. Für die [FAD●-TrpH●+]-RP beobachteten sie Resonanzen bei Frequenzen bis zu 99,3 MHz für ein Modell ohne dipolare Kopplung (eine Elektron-Elektron-Wechselwirkung) und eine Grenzfrequenz in derselben Höhe. In einem realistischeren Modell fanden sie jedoch sehr schwache Resonanzen bei Frequenzen bis zu 183,8 MHz, die insgesamt aber weniger als 1 % der Gesamtzahl der Resonanzen ausmachten. Letztlich schätzten die Autoren die Grenzfrequenz auf 116 MHz.

Kombiniert man den experimentellen Befund einer Grenzfrequenz unterhalb 140 MHz mit der theoretischen Vorhersage einer Grenzfrequenz um 116 MHz, kommen die Autoren zu dem Schluss, dass ein Flavin-haltiges RP der wahrscheinlichste Mechanismus für den Magnetsinn ist, im Gegensatz zu z. B. magnetischen Nanopartikeln. In letzteren läge die Grenzfrequenz um Größenordnungen niedriger.

3 Kommentare des BfS

Diese Arbeit ist ein wichtiger Beitrag auf der Suche nach einer mechanistischen Erklärung für den Magnetsinn von Vögeln. Die Autoren verwenden moderne Spindynamik-Berechnungen, um Grenzfrequenzen in verschiedenen RP-Kandidaten vorherzusagen. Die Einbeziehung von Hyperfeinstruktur-Daten (berechnet mit Hilfe der Dichtefunktionaltheorie) für eine beträchtliche Anzahl von Kernen sowie von dipolaren Kopplungseffekten ermöglicht eine realistische Modellierung des RPM. Alle Daten und der Code, die für die Reproduktion der Arbeit benötigt werden, sind im Begleitmaterial [1] und in einem Git-Repository dokumentiert.

Das hier vorgestellte experimentelle Ergebnis einer Grenzfrequenz unterhalb von 145 MHz und frühere Ergebnisse einer Grenzfrequenz oberhalb von 85 MHz lassen nur ein enges Frequenzfenster für die maximale Frequenz offen, welche ein mechanistisches Modell des zugrundeliegenden Effekts vorhersagen muss. Ein auf Flavin basierender RPM passt gut zu einer Grenzfrequenz, die innerhalb des erwarteten Fensters liegt. Die genaue Lage der Grenzfrequenz hängt allerdings von den Details des Mechanismus ab. Die vorgestellten Ergebnisse unterstützen klar den RPM als Erklärung für die magnetische Wahrnehmung von Vögeln. Im Gegensatz dazu sagen andere mechanistische Modelle, wie z. B. Magnetitpartikel, die auf mechanischen Effekten (wie Rotation oder Taumeln in einem externen HF-Feld) beruhen, keine so genauen Grenzfrequenzen voraus oder verfehlen das entsprechende Frequenzfenster.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegende Arbeit weitere Belege für den RPM als mechanistische Erklärung des Magnetsinns von Vögeln liefert. Auf gesundheitliche Wirkungen von EMF auf den Menschen oder Wirkungen auf die Umwelt lässt sich aus den Ergebnissen jedoch nicht schließen.

Referenzen

- [1] Leberecht, B., Wong, S.Y., Satish, B., Döge, S., Hindman, J., Venkatraman, L., Apte, S., Haase, K., Musielak, I., Dautaj, G. and Solov'yov, I.A., 2023. Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(28), p.e2301153120.
- [2] Werner, H.J., Schulten, K. and Weller, A., 1978. Electron transfer and spin exchange contributing to the magnetic field dependence of the primary photochemical reaction of bacterial photosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 502(2), pp.255-268
- [3] Brocklehurst, B. and McLauchlan, K.A., 1996. Free radical mechanism for the effects of environmental electromagnetic fields on biological systems. *International journal of radiation biology*, 69(1), pp.3-24.
- [4] Ritz, T., Adem, S. and Schulten, K., 2000. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical journal*, 78(2), pp.707-718.
- [5] Hore, P.J. and Mouritsen, H., 2016. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual review of biophysics*, 45, pp.299-344.
- [6] Ritz, T., Thalau, P., Phillips, J.B., Wiltschko, R. and Wiltschko, W., 2004. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*, 429(6988), pp.177-180.
- [7] Leberecht, B., Kobylkov, D., Karwinkel, T., Döge, S., Burnus, L., Wong, S.Y., Apte, S., Haase, K., Musielak, I., Chetverikova, R. and Dautaj, G., 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*, 208(1), pp.97-106.



Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: spotlight@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
[urn:nbn:de:0221-2024050343640](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2024050343640)

Spotlight - Mai/2024 no.1 (Deu)