



## Spotlight on EMF Research

# Spotlight auf den aktuellen Fortschritt in der Forschung zum Radikalpaar-Mechanismus

## Kategorie [Theorie und molekulare Wirkmechanismen]

Spotlight - Apr/2024 no.1 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

## 1 Eine kurze Einführung in den Radikalpaar-Mechanismus durch das BfS

Die folgende Zusammenfassung der Arbeiten [1-6] gibt einen Überblick über die jüngsten Forschungsaktivitäten zum Radikalpaar-Mechanismus (RPM). Magnetische Felder (MF) durchdringen biologisches Gewebe und können daher biophysikalische Prozesse in lebenden Organismen beeinflussen. Die Auswirkungen schwacher MFs, die durch die Wirkung magnetischer Kraftfelder verursacht werden, gelten jedoch üblicherweise als vernachlässigbar klein im Vergleich zum allgegenwärtigen Rauschen in einer biologischen Umgebung. Effekte sind nur als subtile statistische oder quantenmechanische Effekte denkbar. Der Grundgedanke hinter dem RPM ist, dass bei einer Vielzahl von chemischen Reaktionen Radikale als vorübergehende Reaktionszwischenprodukte dienen und derartige Reaktionen durch MFs beeinflusst werden können. Die Veränderung chemischer Reaktionen wiederum könnte etwaige biologische Prozesse beeinflussen und damit eine Wirkung auf Mensch und Umwelt haben.

Für ein kurzes Zeitintervall können die Elektronen in einem Radikalpaar quantenmechanisch korrelierte Spinzustände<sup>1</sup> bilden: Singulett im Falle des Gesamtspins gleich Null und Triplett im Falle des Gesamtspins Eins. Die Wechselwirkung der Spins mit Kernen in den umgebenden Molekülen führt zu einer Fluktuation zwischen Singulett- und Triplett-Zuständen. Ein genau definierter Anteil der Radikale verlässt dann die Reaktion als Singulettprodukt und der Rest als (anderes) Triplettprodukt. Externe MF verändern die kohärente Interkonversion und führen zu einem anderen Singulett-Triplett-Verhältnis, d. h. zu einem anderen Reaktionsergebnis. Biologische Prozesse, welche empfindlich von derartigen Radikalreaktionen abhängen, können somit durch externe MF beeinflusst werden. Dies ist der Radikalpaar-Mechanismus [7-10]. Der RPM beinhaltet zwei gegenläufige Effekte, die von der Stärke der externen MFs abhängen. Bei MFs im Bereich von mT verringert die Zeeman-Aufspaltung<sup>2</sup> die Singulett-Triplett-Umwandlungsrate mit zunehmendem MF,

---

<sup>1</sup> *Spin*: Eine besondere Form des quantenmechanischen Drehimpulses, der von Elementarteilchen getragen wird. Bei Elektronen kann der Spin entweder parallel oder antiparallel zu einer bestimmten Richtung (z. B. der Richtung des äußeren MF) sein. Bei zwei Elektronen addieren sich die Spins entweder zum Gesamtspin 1 oder zum Gesamtspin 0.

<sup>2</sup> *Zeeman-Effekt*: Aufspaltung von Energieniveaus in der Elektronenhülle eines Atoms durch ein äußeres MF, das mit den Spins der Elektronen wechselwirkt. Aufgrund der unterschiedlichen Werte des Spins spalten sich die Energieniveaus der Elektronen in mindestens zwei separate Werte auf. Dies wurde erstmals von P. Zeeman in den Spektrallinien von Natrium beobachtet.

was als "Hochfeldeffekt" bezeichnet wird. Bei schwachen MFs im  $\mu\text{T}$ -Bereich führt die zunehmende Fluktuationswahrscheinlichkeit (im Vergleich zu Null-MF) zu einer steigenden Konversionsrate zwischen den Zuständen mit zunehmendem MF, was als "Niederfeldeffekt" (LFE) bezeichnet wird [11]. Der LFE ist ein vielversprechender Kandidat zur Erklärung des Magnetsinns von Vögeln. Seine Bedeutung für andere biologische Prozesse, insbesondere beim Menschen, wird intensiv diskutiert [12] und derzeit von vielen Forschungsgruppen, darunter auch dem BfS, untersucht.

## 2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive der Autoren

Für den Magnetsinn von Vögeln ist es nötig, sehr schwache MF zu detektieren. Ein entscheidender Parameter für die Magneto-Sensitivität eines Radikalpaares (RP) ist seine Lebensdauer. Die grundlegende Quanteneigenschaft, dass sich zwei Elektronen in einem korrelierten Zustand befinden, wird durch jede Wechselwirkung mit der Umgebung schnell zerstört (Dekohärenz). Um die Auswirkung der Proteinbewegung in der Umgebung eines RP auf seine Quanteneigenschaften, insbesondere die Sensitivität des Magnetsinns, zu untersuchen, verglich [1] die RP-Dynamik in *Erithacus rubecula* (Rotkehlchen, Zugvogel) Cryptochrom (ErCry4a) und *Columba livia* (Tauben, Nicht-Zugvogel) Cryptochrom (ClCry4a) mit *Arabidopsis thaliana* (Pflanze) Cryptochrom (AtCry1). Diese drei Cryptochrom-Arten haben unterschiedliche Magnetosensitivitäten. Bei allen besteht das RP aus einem durch blaues Licht aktivierten Flavin (FAD)-Kofaktor und einem oxidierten Tryptophan und wird mit  $[\text{FAD}\bullet\text{- Trp}\bullet\text{+}]$  bezeichnet. Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei ErCry4a (und ClCry4a) der Elektronendonator entweder der dritte oder der vierte Tryptophan-Rest ist, während es bei AtCry1 der dritte Trp ist. Die Analyse der RP-Umgebung erfolgte zunächst durch Simulation des Cryptochroms mittels Molekulardynamik<sup>3</sup> für alle Atome (für 400ns, nach Äquilibration), gefolgt von einer Dichtefunktionaltheorie (DFT)<sup>4</sup>-Berechnung spezifischer Teile des Proteins, die das  $\text{Trp}\bullet\text{+}$  und  $\text{FAD}\bullet\text{-}$  enthalten. Mit den extrahierten Hyperfeinstrukturdaten wurde die Singulett- und Triplettausbeute der kohärenten RP-Umwandlung durch numerische Lösung der entsprechenden stochastischen Liouville-Gleichung<sup>5</sup> berechnet. Eine signifikante Änderung der Reaktionsausbeuten wird durch Variationen in der Hyperfeinstruktur<sup>6</sup> und den Zeeman-Kopplungen verursacht. Diese werden durch Winkeländerungen in bestimmten Molekülachsen (Flächenwinkel, Dihedral) und relativen Ausrichtungen der aromatischen Ringe von  $\text{FAD}\bullet\text{-}$  und  $\text{Trp}\bullet\text{+}$  (Librationswinkel) beeinflusst. Solche Änderungen werden durch zufällige thermische Bewegungen der Proteinkomponenten hervorgerufen. Die Autoren extrahierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen dieser Parameter aus den Molekulardynamik-Trajektorien und bestimmten den Einfluss auf die Hyperfein- und Zeeman-Kopplungen durch DFT-Berechnungen unter Verwendung der extrahierten Daten. Schließlich wurde die Richtungsabhängigkeit der Magnetosensitivität untersucht, indem die Anisotropie der Singulettausbeute (in Bezug auf die externe MF-Richtung) bestimmt wurde. Die Autoren finden größere Bewegungen in  $\text{Trp}\bullet\text{+}$  als in  $\text{FAD}\bullet\text{-}$ . Die  $\text{Trp}\bullet\text{+}$ -Librationsbewegung ist in pflanzlichem AtCry1 größer als in tierischem ErCry4a und ClCry4a und unterscheidet sich zwischen dem dritten und vierten Trp-Rest, was die unterschiedlichen Umgebungen widerspiegelt. Die Autoren identifizieren die Hyperfein-Wechselwirkungen, die am stärksten von Änderungen der Dihedral- und Librationsparameter betroffen sind (die  $\text{H}\beta$ -Protonen sowohl in  $\text{FAD}\bullet\text{-}$  als auch  $\text{Trp}\bullet\text{+}$ ). Die Autoren stellen jedoch auch fest, dass die anisotropen MF-Effekte und damit die Sensitivität des Magnetkompasses stark abnehmen, sobald mehr hyperfein gekoppelte Kerne in die Berechnungen einbezogen werden.

<sup>3</sup> *Molekulardynamik*: Eine Simulationsmethode, bei der die Newtonschen Bewegungsgleichungen (zusammen mit einem stochastischen Hintergrund) für alle Atome in einem molekularen System (z. B. ein Protein in Wasser) numerisch gelöst werden. Die Wechselwirkungen des Moleküls, wie Bindungen und elektrostatische Kräfte, bestimmen die potentielle Energie in den Gleichungen.

<sup>4</sup> *Dichtefunktionaltheorie*: Berechnungsmethode zur Bestimmung des quantenmechanischen Zustands eines großen quantenmechanischen Systems aus mehreren Komponenten, z. B. mehreren Elektronen.

<sup>5</sup> *Liouville-Gleichung*: Differentialgleichung, die die quantenmechanische Zeitentwicklung eines oder mehrerer Teilchen beschreibt. Sie kann als Quantenanalogue der klassischen mechanischen Bewegungsgleichungen betrachtet werden und ist eng mit der von-Neumann-Gleichung für ein geschlossenes Quantensystem verwandt.

<sup>6</sup> *Hyperfeinstruktur*: Die quantenmechanische Wechselwirkung der Elektronenspins in einer Elektronenhülle mit den magnetischen Kernmomenten in einem Atom führt zu einer Substruktur von Elektronenenergieniveaus, die als Hyperfeinstruktur bezeichnet wird.

Anisotrope Hyperfein-Wechselwirkungen sind die Grundlage der richtungsabhängigen MF-Wahrnehmung. Die Bedeutung der Wechselwirkung eines RP mit kernmagnetischen Momenten (Hyperfein-Wechselwirkung) der molekularen Umgebung wurde in [2] untersucht. Die Autoren machen sich die Tatsache zunutze, dass die Veränderung der Eigenschaften der an den Hyperfein-Wechselwirkungen beteiligten Kerne zu einer Änderung der richtungsabhängigen MF-Sensitivität führt, was wiederum einen Einblick in die Hyperfeinstruktur der Proteinumgebung in der Nähe eines RP ermöglicht. Die Kerneigenschaften werden durch den Austausch eines Kerns gegen ein Isotop verändert. Insbesondere haben die Autoren die Isotope  $^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H}$ ,  $^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$  und  $^{14}\text{N} \rightarrow ^{15}\text{N}$  in FAD-Trp und FAD-Z RPs ausgetauscht, wobei Z eine Komponente ohne Hyperfeinstrukturkopplung bezeichnet. Die Änderungen der Hyperfeinstruktur wurden mit Hilfe von DFT berechnet und anschließend mit Hilfe von Spindynamiksimulationen (ähnlich wie in [1]) untersucht, um die Änderungen der richtungsabhängigen MF-Sensitivität zu bestimmen. Die Autoren stellen fest, dass die Substitution von Stickstoff keine signifikante Auswirkung hat, was mit der Ähnlichkeit der magnetischen Momente der beiden Stickstoffisotope im Einklang steht. Die Deuterierung erhöht die richtungsabhängige MF-Sensitivität, während die Kohlenstoffsubstitution sie verringert. Im Allgemeinen sind die beobachteten Effekte sehr gering. Die Änderungen liegen unter 0,1 %. Es bleibt weiterhin eine offene Frage, ob und wie derart kleine Effekte in vivo durch Magnetfelder in der Vogelnetzhaute verstärkt werden.

Der Einfluss der molekularen Umgebung eines RP aufgrund von Hyperfein-Wechselwirkungen wird in [3] für ein [FAD•- Trp••] RP weiter untersucht. Eine Möglichkeit, letztere zu quantifizieren, ist der sogenannte Halbfeldparameter  $B_{1/2}$ , der diejenige MF-Stärke ausdrückt, bei der die Änderungsrate der Reaktionsprodukte in der Mitte zwischen dem Wert ohne externe MF und ihrer Sättigung bei sehr hohen externen MF liegt. Zur Bestimmung der Reaktionsproduktausbeute haben die Autoren mehrere numerische Simulationen durchgeführt, die von perturbativen Methoden (Schulzen-Wolynes-Methode [13]) über quantenmechanische Monte-Carlo-Rechnungen bis hin zur expliziten Berechnung der Quantendynamik reichen. Je nach Methode wurden unterschiedliche Aspekte der molekularen Umgebung des RP berücksichtigt: unterschiedliche Anzahl von Kernspins, verschiedene Genauigkeitsgrade der Hyperfein-Kopplungen und Einbeziehung anderer Wechselwirkungen, wie z. B. dipolarer Kopplungen<sup>7</sup>. Die detaillierten Simulationen zeigen eine Diskrepanz zu früheren Ergebnissen [14]. Es wird geschlossen, dass letztere nur im Fall von kurzlebigen, schnell taumelnden RP anwendbar sind, im Gegensatz zu dem langsam taumelnden Cryptochrom-Makromolekül. Für dieses finden die Autoren einen Wert von  $B_{1/2} = 2,46 \text{ mT}$ . Ferner wird beobachtet, dass die Einbeziehung anisotroper Hyperfein-Kopplungen den LFE und damit die Sensitivität des Magnetkompasses für schwache MF, in den Simulationen aufhebt, was teilweise im Widerspruch zu experimentellen Ergebnissen steht (z. B. LFE in AtCry1). Es werden weitere Simulationen und Experimente vorgeschlagen, um diese Frage zu klären.

Eine weitere, noch spekulativere Möglichkeit, wie die molekulare Umgebung die Dynamik eines RP und damit die Sensitivität des Magnetsinns von Zugvögeln beeinflussen könnte, wurde in [4] untersucht. Wenn die Umgebung des RP eine chirale elektronische Struktur hat (wie es beim helikalen elektrostatischen Potential in Proteinsubdomänen der Fall ist), hemmt die Wechselwirkung des Spins der Elektronen mit ihrem linearen Impuls (aufgrund der Bewegung) die Ausbreitung einer der Spinpolarisationen. Folglich befindet sich das RP nach dem Elektronentransfer nicht in einem reinen Singulett- oder Triplett-Zustand, sondern eher in einer Superposition aus beiden. Dies ist der Effekt der chiral-induzierten Spin-Selektivität (CISS) (siehe [15] für eine Behandlung im Zusammenhang des RPMs). Die Autoren von [4] untersuchen den Einfluss von CISS auf die MF-Sensitivität, den Bereich der extremalen Sensitivität ("funktionales Fenster") und auf Elektron-Elektron-Wechselwirkungen. Sie verwenden sowohl ein einfaches Spielzeugmodell als auch ein realistischeres RP-Modell mit vier Kernen und zwei Elektronen zusammen mit typischen CISS-Ausgangszuständen, wie sie in [15] vorgestellt wurden. Es wird festgestellt, dass bei bestimmten

---

<sup>7</sup> *Dipolare Kopplung*: Ähnlich wie die Wechselwirkungsenergie magnetischer Dipole weisen die Spins zweier Elektronen (z. B. in einem RP) eine spezifische Wechselwirkungsenergie auf, die durch ihre Spinquantenzahlen und einen dipolaren Kopplungsparameter gekennzeichnet ist, der den Abstand und die Ausrichtung der Spins widerspiegelt.

Kombinationen von Reaktionsgeschwindigkeiten eine Verbesserung der MF-Sensitivität möglich ist. Allerdings geht in diesem Fall die Symmetrie der Reaktionsausbeuten in Bezug auf die Inversion der MF-Richtung verloren. Das funktionale Fenster liegt in einem anderen Wertebereich bei Verwendung des realistischen Modells. Schließlich wird die abschwächende Wirkung von Elektron-Elektron-Wechselwirkungen auf Magnetfeldeffekte für bestimmte Reaktionsratenkombinationen abgemildert.

Die Kerne in der Umgebung eines RP bestimmen in hohem Maße die Stärke der MF-Effekte, insbesondere die Möglichkeit einer Richtungsempfindlichkeit. Die Autoren von [5] untersuchen ein scharfes Minimum in der Rekombinationsausbeute eines [FAD•- Trp•+] RP (den "Quanten-Nadeleffekt"), indem sie analytisch und numerisch die Abhängigkeit der Reaktionsausbeuten von der Hyperfeinstruktur analysieren. Für ein idealisiertes Modell, bestehend aus dem RP und den Stickstoffkernen N5 in FAD•- und N1 Trp•+, bestimmen die Autoren das Energiespektrum und die entsprechenden Eigenzustände des Systems in Abhängigkeit von der Hyperfeinstruktur und des äußeren MF. Sie stellen fest, dass im Falle einer anisotropen Hyperfeinstruktur ein richtungsabhängiges externes MF zu einem Flip in bestimmten Spinzuständen (in einem spezifischen Winkel in Bezug auf das externe MF) und damit zu einer starken Veränderung der Reaktionsausbeuten führt. Dies trägt zum Verständnis des Mechanismus der Richtungsempfindlichkeit im RPM auf Quantenebene bei.

Auf der experimentellen Seite untersuchten die Autoren von [6] die Empfindlichkeit des magnetischen Kompasses des Trauerschnäppers *Ficedula hypoleuca* gegenüber Störungen durch ein oszillierendes MF. Die Vögel wurden einem oszillierenden MF mit einer Frequenz von 1,41 MHz (der Larmor-Frequenz<sup>8</sup> eines Elektronenspins in einem natürlichen MF von 50,4  $\mu$ T) mit Amplituden von 17 nT bzw. 190 nT ausgesetzt. Die Exposition wurde durch Single-Loop-Spulen mit einem Durchmesser von 0,75 m in Verbindung mit einem Rigol DG4162 Hochfrequenzgenerator erzeugt. Die Pfade der Tiere wurden in Emlen-Trichtern aus Kunststoff aufgezeichnet. Bei den Kontrollexperimenten, bei denen die Vögel nur dem lokalen geomagnetischen Feld ausgesetzt waren, wurden die Bahnen in Emlen-Trichtern aus Aluminium aufgezeichnet. Während bei 17 nT die Orientierung der Vögel nicht gestört wurde, ging sie bei 190 nT verloren. Die Ergebnisse bestätigen die Störung des magnetischen Kompasses von Zugvogelarten durch schwache, oszillierende MF. Allerdings tritt der Effekt bei MF-Stärken auf, die um etwa zwei Größenordnungen höher liegen als bei der am meisten untersuchten Art (*Sylvia borin*). Bei der Gartengrasmücke *Sylvia borin* tritt die Kompassstörung bereits bei MF in der Größenordnung von 1nT auf. Die Erklärungen für diese sehr unterschiedlichen Empfindlichkeiten reichen von biophysikalischen Unterschieden zwischen den entsprechenden Cryptochromen und ihrer Umgebung bis hin zu ökologischen Anpassungen der Arten. Die Autoren betonen, dass die Ergebnisse die Komplexität des magnetischen Kompasses der Vögel sowohl in biophysikalischer als auch in biologischer Hinsicht unterstreichen.

### 3 Kommentare des BfS

Die von den Autoren von [1] angewandten Methoden umfassen sowohl klassische Molekulardynamiksimulationen als auch DFT-Berechnungen spezifischer Ausschnitte der Cryptochrom-Proteine. Mit Hilfe von Spindynamiksimulationen werden Singulett- und Triplett-Quantenausbeuten ermittelt, die wiederum die richtungsabhängige MF-Sensitivität bestimmen. Die Arbeit liefert neue Erkenntnisse über den Einfluss von Größe und Bewegungszustand der Cryptochrom-Umgebung auf die (richtungsabhängige) MF-Sensitivität von [FAD•- Trp•+] Radikalpaaren. Die Ergebnisse sind entscheidend, um die Bedeutung von MF-Effekten in realistischen biologischen Umgebungen zu bewerten. Die Autoren von [2] verwenden ähnliche Berechnungsmethoden wie [1], die den derzeitigen Stand der Technik darstellen. Die angewandten Isotopensubstitutionen geben Aufschluss über die Bedeutung der Proteinumgebung für die richtungsabhängige MF-Wahrnehmung in realistischen biologischen Systemen,

---

<sup>8</sup> Larmor-Frequenz: Ähnlich wie bei einem klassischen Gyroskop präzisiert das magnetische Moment des Elektrons in einem äußeren MF. Die Präzessionsfrequenz wird als Larmor-Frequenz bezeichnet und ist durch  $\frac{eg}{2m}B$  gegeben, wobei  $e$  die Elementarladung,  $g$  der  $g$ -Faktor des Elektrons,  $m$  die Elektronenmasse und  $B$  das MF ist.

insbesondere für den Magnetsinn von Vögeln. Die in [3] verwendeten Berechnungsmethoden decken ein breites Spektrum an verfügbaren Werkzeugen zur Simulation großer Spinsysteme ab. Ihre Erkenntnis, dass die Einbeziehung anisotroper Hyperfein-Wechselwirkungen den LFE in bestimmten Cryptochrom-RP verringert oder sogar aufheben kann, hat Konsequenzen für die Bedeutung von RPM-Effekten bei der Erkennung schwacher MF in der Größenordnung von  $\mu\text{T}$ . Eine weitere Verfeinerung der Simulationen sowie experimentelle Untersuchungen möglicher LFE in ErCry4a und seinen Mutanten sind erforderlich, um Unstimmigkeiten zwischen Simulationen und Experimenten zu klären. Der in [4] untersuchte CISS-Effekt ist eine spekulativere Variante der lokalen Umgebungsinteraktion mit einem RP. Insbesondere scheint die Anisotropie der MF-Effekte in Bezug auf die Änderung des Vorzeichens der externen MF im Widerspruch zu aktuellen Tierversuchen zu stehen. Dennoch stellt dies eine interessante Möglichkeit dar, wie die helikalen Proteinsubdomänen die MF-Sensitivität im RPM prinzipiell erhöhen könnten. Auf technischer Ebene werden in [4] rechnerische Details wie die gewählten numerischen Algorithmen nicht erwähnt, so dass die Gültigkeit der numerischen Ergebnisse nicht beurteilt werden kann. Die Autoren von [5] leiten eine sehr genaue Erklärung der Richtungsempfindlichkeitseffekte im RPM ab, indem sie ein idealisiertes RP-Modell verwenden. Letzteres ist geeignet, die quantenmechanischen Ursprünge für die Richtungsempfindlichkeit deutlich darzustellen, allerdings ist dies mit Abstrichen bei der Realitätstreue verbunden. Insbesondere die schnelle Spinrelaxation sowie interradikale Effekte wie dipolare Kopplungen und Austauschwechselwirkungen verringern die Richtungsempfindlichkeit erheblich. Außerdem ist bekannt, dass die Berücksichtigung einer größeren Anzahl von Kernen die MF-Sensitivität im Allgemeinen beeinträchtigt. Dennoch geben die Autoren eine klare mechanistische Erklärung für die Richtungseffekte im RPM.

Zusammenfassend zeigen die vorgestellten Arbeiten die enormen Anstrengungen, die derzeit unternommen werden, um die Auswirkungen relativ schwacher Magnetfelder auf biologische Systeme auf fundamentaler Ebene besser zu verstehen. Die Rolle des RPM für den Magnetsinn von Zugvögeln, welche den Hauptgegenstand der hier besprochenen Arbeiten darstellt, ist noch nicht endgültig geklärt. Selbst wenn solche Prozesse auf fundamentaler Ebene sich als konsistent nachgewiesen ergeben würden, ist dann immer noch unklar, ob dies letztendlich zu einer biologischen Wirkung und diese wiederum zu einer Krankheit beim Menschen führen würde.

## Referenzen

- [1] Grüning, G., Wong, S.Y., Gerhards, L., Schuhmann, F., Kattinig, D.R., Hore, P.J. and Solov'yov, I.A., 2022. Effects of Dynamical Degrees of Freedom on Magnetic Compass Sensitivity: A Comparison of Plant and Avian Cryptochromes. *Journal of the American Chemical Society*, 144(50), pp.22902-22914.
- [2] Pazera, G.J., Benjamin, P., Mouritsen, H. and Hore, P.J., 2023. Isotope Substitution Effects on the Magnetic Compass Properties of Cryptochrome-Based Radical Pairs: A Computational Study. *The Journal of Physical Chemistry B*, 127(4), pp.838-845.
- [3] Wong, S.Y., Benjamin, P. and Hore, P.J., 2023. Magnetic field effects on radical pair reactions: estimation of  $B_{1/2}$  for flavin-tryptophan radical pairs in cryptochromes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(2), pp.975-982.
- [4] Tiwari, Y. and Poonia, V.S., 2022. Role of chiral-induced spin selectivity in the radical pair mechanism of avian magnetoreception. *Physical Review E*, 106(6), p.064409.
- [5] Bezchastnov, V. and Domratcheva, T., 2023. Quantum-mechanical insights into the anisotropic response of the cryptochrome radical pair to a weak magnetic field. *The Journal of Chemical Physics*, 158(3).
- [6] Bojarinova, J., Kavokin, K., Cherbunin, R., Sannikov, D., Fedorishcheva, A., Pakhomov, A. and Chernetsov, N., 2023. Sensitivity threshold of avian magnetic compass to oscillating magnetic field is species-specific. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(1), p.6.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] Ritz, T., Adem, S. and Schulten, K., 2000. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical journal*, 78(2), pp.707-718.
- [10] Hore, P.J. and Mouritsen, H., 2016. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annual review of biophysics*, 45, pp.299-344.
- [11] Timmel, C.R., Till, U., Brocklehurst, B., McLauchlan, K.A. and Hore, P.J., 1998. Effects of weak magnetic fields on free radical recombination reactions. *Molecular Physics*, 95(1), pp.71-89.
- [12] Hore, P.J., 2019. Upper bound on the biological effects of 50/60 Hz magnetic fields mediated by radical pairs. *Elife*, 8, p.e44179.
- [13] Schulten, K. and Wolynes, P.G., 1978. Semiclassical description of electron spin motion in radicals including the effect of electron hopping. *The Journal of Chemical Physics*, 68(7), pp.3292-3297. {34} in [3].
- [14] Weller, A., Nolting, F. and Staerk, H., 1983. A quantitative interpretation of the magnetic field effect on hyperfine-coupling-induced triplet formation from radical ion pairs. *Chemical Physics Letters*, 96(1), pp.24-27. {7} in [3].
- [15] Luo, J. and Hore, P.J., 2021. Chiral-induced spin selectivity in the formation and recombination of radical pairs: cryptochrome magnetoreception and EPR detection. *New Journal of Physics*, 23(4), p.043032.



Bundesamt  
für Strahlenschutz

## **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](mailto:spotlight@bfs.de)

De-Mail: [epost@bfs.de-mail.de](mailto:epost@bfs.de-mail.de)

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
[urn:nbn:de:0221-2024040442643](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2024040442643)

Spotlight - Mar/2024 no.1 (Deu)