

BIOPHYSIK

# Nur dem Schnabel nach?

Wie sich Vögel und andere Tierarten am Erdmagnetfeld orientieren.

Ilia A. Solov'yov, Klaus Schulten und Walter Greiner

Tiere haben offenbar die Fähigkeit, das Magnetfeld der Erde wahrzunehmen und sich daran zu orientieren. Seit Mitte der 1960er-Jahre gelang es, diesen Magnetsinn bei höheren Organismen experimentell nachzuweisen. Am besten untersucht ist heute der „Magnetkompass“ der Zugvögel. Dennoch gelten dessen Details immer noch als weitgehend ungeklärt.

Zugvögel legen bei ihren halbjährlichen Flügen hunderte bis tausende Kilometer zurück. Rekordhalterin ist die Küstenseeschwalbe, die im Jahr den Weg von der Arktis zur Antarktis fliegt. Doch wie gelingt es den Zugvögeln, immer wieder ihren Weg zu finden? Verschiedene Versuche mit in der Wildnis gefangenen sowie in Gefangenschaft aufgezogenen Vögeln haben gezeigt, dass sie sich anhand von Himmelsobjekten und dem Erdmagnetfeld orientieren. Innere Uhren erlauben es ihnen, tagsüber die Lage des Azimuts der Sonne und somit die Himmelsrichtungen zu bestimmen (Sonnenkompass). Auch das Polarisationsmuster des Sonnenlichts, das besonderes gut bei Sonnenaufgang wahrzunehmen ist, spielt eine wichtige Rolle bei der Orientierung. Indem sie das Rotationszentrum des Sternhimmels beobachten, lernen die jungen Vögel die räumlichen Beziehungen zwischen den Sternpositionen, sodass sie sich auch mit dem Sternkompass orientieren können [1, 2]. Viele Vögel sind aber imstande, ihren Kurs auch dann zu halten, wenn ihnen eine dichte Wolkendecke den freien Blick auf den Himmel versperrt.

Bereits 1859 speulierte Alexander von Middendorff, ein baltendeutscher Zoologe in russischen Diensten, darüber, dass die Vögel das Erdmagnetfeld fühlen können. Erst ab Mitte der 1960er-Jahre brachten die bahnbrechenden Experimente der Frankfurter Ornithologen Roswitha und Wolfgang Wiltschko Gewissheit. Angeregt von Friedrich Wilhelm Merkel hielt das Forscherpaar Rotkehlchen in einem Käfig und legte darüber ein Magnetfeld: Die Rotkehlchen folgten dem Magnetfeld und drückten dort gegen die begrenzende Wand, wo das Magnetfeld hinführte. Heute steht außer Frage, dass Tauben, Rotkehlchen und andere Vögel das Erdmagnetfeld als Kompass verwenden und möglicherweise schon geringe zeitliche und räumliche Änderungen des Feldes zur Positionsbestimmung nutzen können [1, 2].



Kanadakraniche entfliehen dem Winter in Nordkanada, Alaska und Sibirien, in dem sie in den Südwesten der USA und ins nördliche Mexiko fliegen. Dabei

müssen sie bis zu 8000 Kilometer zurücklegen, womit sie zu den Rekordhaltern innerhalb der Kranichvögel zählen.

Aber nicht nur Vögel haben einen Sinn für Magnetfelder, sondern auch niedere Wirbellose wie Würmer oder Insekten bis hin zu Amphibien und Säugetieren. So ließ sich nachweisen, dass sich auch Salamander, Frösche und Schildkröten am magnetischen Feld orientieren, und dass Honigbienen die Magnetorezeption beim Wabenbau und zur Orientierung im Stock nutzen. Fledermäuse orientieren sich bei Langstreckenflügen an den Linien des Erdmagnetfeldes, ähnlich wie die Zugvögel. Auch Fische können Magnetfelder spüren: Tiger-, Blau- und Hammerhaie schwimmen über lange Strecken geradeaus und halten dabei auf Unterwasserberge zu, also Orte geomagnetischer Störungen [2, 3].

## KOMPAKT

- Verhaltens- und physiologische Untersuchungen zeigen, dass bei Vögeln zwei Magnetorezeptionsorgane unterschiedliche Parameter des Erdmagnetfeldes detektieren.
- Ein lichtabhängiger Prozess dient dazu, den Inklinationwinkel der Magnetfeldlinien zu bestimmen. Diesen Inklinationssinn nutzen die Zugvögel zur Orientierung.
- Magnetit-vermittelte Prozesse im Schnabel liefern den Vögeln Informationen über die magnetische Landkarte. Dieser Magnetkompass ist unabhängig vom Licht und auch für z. B. Fische oder Maulwürfe wichtig.

Dr. Ilia A. Solov'yov, Prof. Dr. Walter Greiner, Frankfurt Institute for Advanced Studies, Goethe Universität, Ruth-Moufang Str. 1, 60438 Frankfurt am Main; Prof. Dr. Klaus Schulten, Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, and Beckman Institute for Advanced Science and Technology

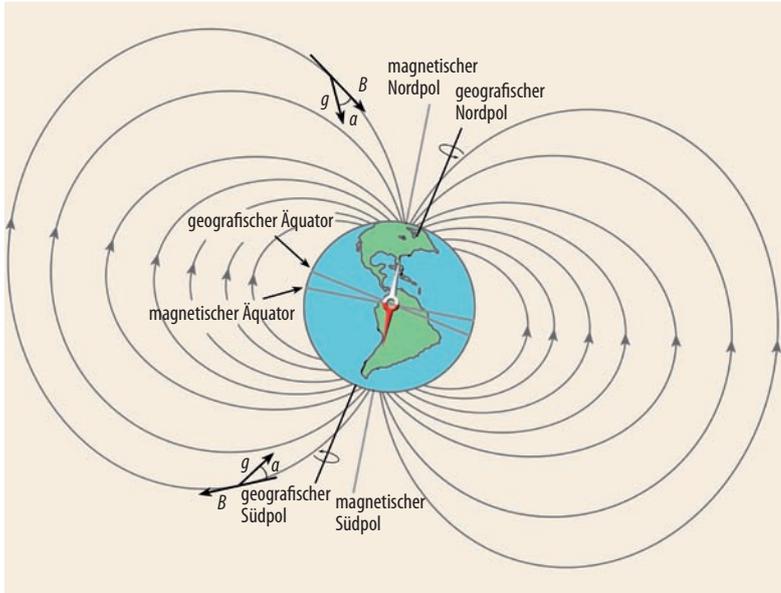


Abb. 1 Das Erdmagnetfeld ist mit 68  $\mu\text{T}$  (oder 0,68 G) an den Magnetpolen am stärksten und beträgt am Äquator ungefähr 23  $\mu\text{T}$ .  $g$  zeigt die Richtung der

Schwerkraft an,  $a$  ist der Winkel zwischen der Schwerkraft und der Magnetfeldrichtung auf der Nord- bzw. Südhemisphäre.

Das lässt kaum mehr Zweifel an dieser Sinnesleistung, über die im Vergleich zu den anderen Sinnen allerdings sehr wenig bekannt ist. Da das Erdmagnetfeld relativ schwach ist, sollte ein Magnetorezeptor sowohl die absolute Stärke als auch kleine Schwankungen des Feldes registrieren können. Auch lässt sich die Magnetorezeption bisher keinem Organ eindeutig zuordnen. Statische Magnetfelder dringen tief in das organische Material ein, sodass sich der Rezeptor fast überall im Körper befinden kann.

Zugvögel haben einen „Inklinationskompass“, der Informationen über den Verlauf der Magnetfeldlinien entlang der magnetischen Nord-Süd-Achse und deren Neigungswinkel relativ zur Schwerkraft liefert [2] (Abb. 1). Auf beiden Halbkugeln zeigt die Öffnung des Inklinationswinkels immer in Richtung des näherliegenden Pols, während die Spitze des Winkels zum Äquator zeigt. Die Vögel unterscheiden also zwischen „polwärts“ und „äquatorwärts“. Daher nimmt man an, dass die Vögel auf der Nord- und der Südhalbkugel ein ähnliches Zugprogramm erben.

Wenn die Tage im Herbst kürzer oder im Frühling länger werden, ergreift die Vögel die Zugruhe. Dann wollen sie sich bevorzugt in die natürliche Zugrichtung bewegen, äquatorwärts im Herbst und polwärts im Frühling. Die Richtung lässt sich messen, indem man die Vögel einzeln für ungefähr eine Stunde in sog. Orientierungstrichter setzt, deren Wand mit Tipp-Ex-Papier (Schreibmaschinenkorrekturpapier) ausgekleidet ist. Anschließend zählt man winkelaufgelöst die Zahl der Kratzer, die der Vogel auf dem Papier hinterlassen hat [1, 2].

Solche Orientierungsversuche haben gezeigt, dass die Funktion des Inklinationskompasses von der Wellenlänge und der Intensität des Lichts abhängt [2, 4]. Die Vögel können sich problemlos in die populationspezifische Zugrichtung orientieren, wenn sie

blauem, türkisfarbenem oder grünem Licht ausgesetzt sind. Unter gelbem oder rotem Licht sind sie hingegen völlig desorientiert. Neben der Kompass-Orientierung können Vögel und viele Tiere offenbar auch geologische Magnetfeldanomalien erkennen, die u. a. in bestimmten Küstenbereichen auftreten [2, 3]. Dieser Mechanismus ist aber lichtunabhängig, ebenso wie die Orientierung bei Schildkröten, Fischen oder auch Maulwürfen. Zur Erklärung des Magnetsinns von Vögeln gibt es daher derzeit zwei Thesen.

Die erste These geht auf die bereits erwähnten Experimente an Rotkehlchen im Magnetfeld zurück [2]. Demnach sitzt der Magnetsinn im Auge. Bei Garten-grammücken und wohl auch bei anderen Zugvögeln kommen in der Netzhaut „magnetisch empfindliche“ Moleküle vor [1,5]. Diese Cryptochrome sind Photorezeptor-Signalproteine für blaues Licht, die in verschiedenen Tierarten und Organismen hauptsächlich Regulatorfunktion ausüben (Abb. 2a).<sup>1)</sup> Offenbar spielen sich innerhalb des Proteins Prozesse ab, die sich durch ein Magnetfeld beeinflussen lassen. Dieser Mechanismus erklärt den Inklinationskompass sowie seine Lichtabhängigkeit bei Vögeln.

Die zweite These beruht auf der Entdeckung der Biologen Gerta und Günther Fleissner, dass sich bei verschiedenen Vogelarten in der Haut oberhalb des Schnabels mikroskopisch kleine Körnchen aus dem magnetischen Mineral Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) befinden [7, 17]. Diese Körnchen drücken offenbar auf spezielle Zellen, die mit dem Nervensystem des Vogels verbunden sind (Abb. 2b). Ein Magnetfeld kann die Wechselwirkung zwischen den Körnchen beeinflussen und damit die Öffnung spezifischer Ionenkanäle in der Nervenzellenmembran verursachen. Die ursprünglichste Form dieses Mechanismus' haben wohl Bakterien, die sich ebenfalls mittels Magnetitkristallen am Feld der Erde ausrichten [8]. Dieser Mechanismus erklärt das Verhalten von Vögeln und anderen Tieren bei Magnetfeldanomalien sowie im Dunkeln.

Zwei Mechanismen wurden für die Vogel-Magnetorezeption vorgeschlagen. Zunächst betrachtete man sie als konkurrierend. Jedoch zeigen viele Experimente, dass zumindest bei Vögeln beide Mechanismen nebeneinander existieren können [1].

## Der Kompass im Auge

Der im Auge verankerte Magnetsinn beruht auf der Entstehung eines sog. Radikalpaares von zwei Molekülen. Unter einem freien Radikal versteht man ein Molekül mit ungerader Anzahl von Elektronen. Durch die nicht voll besetzten Elektronenorbitale sind freie Radikale sehr reaktiv, sodass ihre Lebensdauer normalerweise kürzer als eine Millisekunde ist. Das Radikalpaar entsteht aus einem Molekülpaar durch Lichtanregung und Elektronübertragung. Gemäß der Wignerschen Auswahlregel sind die Spins der beiden ungepaarten Elektronen anfänglich in einem Singulett-Zustand ( $S=0$ ). Durch den Einfluss der Hyperfein-

1) Z. B. um den Zirkadianrhythmus bei Säugtieren zu unterhalten und bei der Inhibition des Hypocotylwachstums in Pflanzen [6].

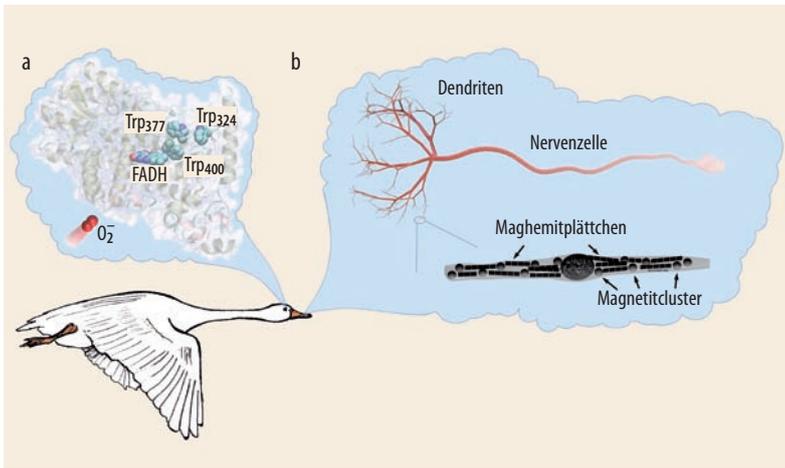


Abb. 2 Das Protein Cryptochrom ist für blaues Licht empfindlich und befindet sich im Auge von Vögeln sowie in einigen anderen Tieren und Pflanzen (a). In den Nervenzellen des oberen Schnabels verschiedener Vogelarten enthalten die Nervenzellendriten die magnetischen Mineralien Magnetit und Maghemit (b).

Wechselwirkung zwischen den ungepaarten Elektronenspins und Kernspins der Radikale sowie infolge der Zeeman-Wechselwirkung der Elektronenspins mit einem äußeren Magnetfeld ändert sich der Gesamtspinzustand der beiden ungepaarten Elektronen zu einer Mischung mit Singulett- und Triplett-Charakter. Welcher der Spinzustände vorherrscht, hängt vom Magnetfeld ab – und zwar nicht nur von dessen Stärke, sondern auch von dessen Richtung. Dazu muss der Abstand zwischen den Radikalen groß genug sein, um Dipol-Dipol- und Austauschwechselwirkungen im Vergleich zur Hyperfeinwechselwirkung klein zu halten. Singulett- und Triplett-Zustände führen durch Elektronenrückübertragung nach der Wignerschen Auswahlregel jeweils zu verschiedenen chemischen Reaktionsprodukten [9–12].

Die Änderung des Elektronenspinzustandes des Radikalpaares ist im Prinzip einfach zu verstehen. Der Triplett-Zustand T spaltet in drei Unterzustände  $T_{+1}$ ,  $T_{-1}$  und  $T_0$  auf, der Singulett-Zustand aber nicht. Ohne äußeres Magnetfeld mischen Triplett- und Singulett-Zustände daher aufgrund der Hyperfeinwechselwirkung im Verhältnis von etwa 3 zu 1. Ein externes Magnetfeld trennt wegen des Zeeman-Effekts die unterschiedlichen Triplett-Radikalpaare und erhöht die für den Übergang zwischen dem Singulett S und den Triplets  $T_{+1}$  und  $T_{-1}$  notwendige Energie. Dadurch wird der Übergang unmöglich, sodass die Singulett- und Triplett-Zustände S bzw.  $T_0$  im Verhältnis 1:1 mischen.

Der Radikalpaarmechanismus ist für die Cryptochrom-Magnetorezeption verantwortlich. Blaues Licht regt ein Chromophor an (Flavin Adenine Dinucleotide, FAD), das sich im Inneren des Cryptochroms befindet (Abb. 2a). Danach findet eine Transferreaktion statt, bei der das angeregte FAD ein Elektron von einer Tryptophan-Aminosäure ( $\text{Trp}_{324}$ ,  $\text{Trp}_{377}$ ,  $\text{Trp}_{400}$ ) erhält. So entsteht ein FAD-Trp-Radikalpaar im Singulett-Zustand [10, 12]. Vor der Lichtabsorption ist der FAD-Chromophor im oxidierten Zustand zu finden. Im aktiven Zustand des Chryptochroms wird FAD in  $\text{FADH}^{\bullet}$  umgewandelt (Abb. 3).

Die Radikalpaare  $^1[\text{FADH}^{\bullet}\dots\text{Trp}^{\bullet}]$  und  $^3[\text{FADH}^{\bullet}\dots\text{Trp}^{\bullet}]$  sind im Singulett- bzw. Triplett-Zustand zu finden. Die beiden Zustände haben unterschiedliche

chemische Eigenschaften und führen letztlich zu verschiedenen chemischen Reaktionsprodukten. Da ein Magnetfeld den Übergang zwischen dem Singulett- und dem Triplett-Zustand induziert, hängen die Reaktionsprodukte vom Feld ab.

Die Lebensdauer von Chryptochrom im aktiven Zustand beträgt zirka eine bis zehn Millisekunden, wobei das  $\text{FADH}^{\bullet}$  langsam in den ursprünglichen FAD-Zustand zurückgeht [13]. Das Superoxidradikal  $\text{O}_2^{\bullet-}$  beendet möglicherweise den Reaktionszyklus (Abb. 3). Diese letzte Reaktion läuft ohne Licht („dunkel“) und aufgrund der niedrigeren Konzentration von  $\text{O}_2^{\bullet-}$  langsam ab. Weil das Superoxidradikal ein Radikalpaar mit dem  $\text{FADH}^{\bullet}$  bildet, lässt sich die Dunkelreaktion auch durch externe Magnetfelder beeinflussen.

Unter dem Einfluss eines externen Magnetfelds kann sich der Spinzustand des Radikalpaares des Cryptochroms ändern. Dadurch erhöht sich der Anteil von Triplett-Radikalpaaren. Die Radikalpaare im Cryptochrom bilden von den Spinrichtungen abhängige Zerfallsprodukte, die wiederum die Aktivität des Chryptochroms beeinflussen. Es ist bemerkenswert, dass Cryptochrom blaues oder grünes Licht braucht,

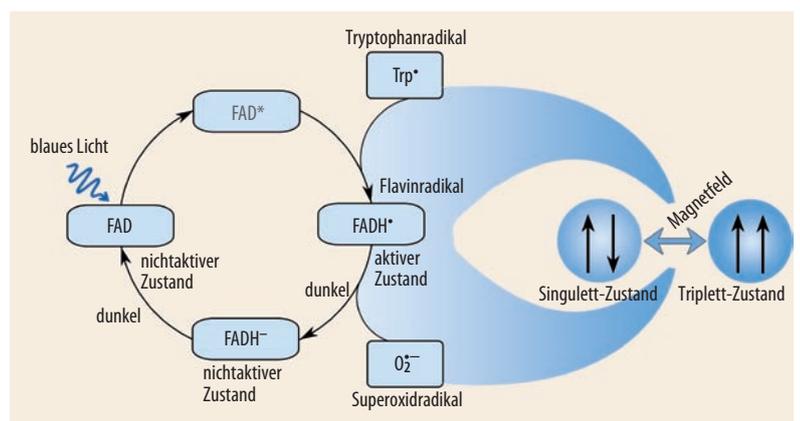


Abb. 3 Der aktive Zustand des Chryptochroms wird durch den Oxidationszustand des FAD-Chromophors gesteuert, der in drei unterschiedlichen Formen FAD,  $\text{FADH}^{\bullet}$  und  $\text{FADH}^{-}$  zu finden ist [6]. Der FAD-Zustand entspricht dem nichtaktiven Zustand des Cryptochroms und wird in großen Mengen bei Dunkelheit produziert. Blaues Licht wandelt FAD in

das  $\text{FADH}^{\bullet}$  um, das dem aktiven Zustand des Cryptochrom entspricht. Durch eine weitere Reaktion entsteht aus dem  $\text{FADH}^{\bullet}$ -Zustand der inaktive  $\text{FADH}^{-}$ -Zustand. Die Reaktionen  $\text{FAD} \rightarrow \text{FADH}^{\bullet}$  und  $\text{FADH}^{\bullet} \rightarrow \text{FADH}^{-}$  sind durch die Radikalpaare  $[\text{FADH}^{\bullet}\dots\text{Trp}^{\bullet}]$  und  $[\text{FADH}^{\bullet}\dots\text{O}_2^{\bullet-}]$  möglich und deswegen von dem externen Magnetfeld beeinflussbar.

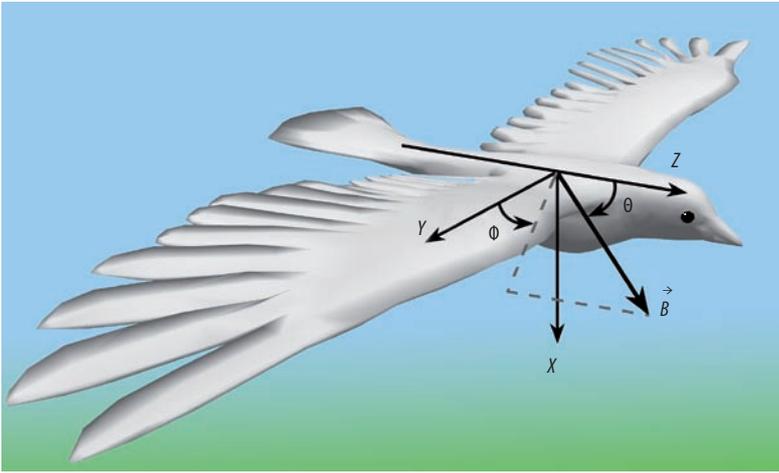


Abb. 4 Die Winkel  $\Theta$  und  $\Phi$  charakterisieren die Richtung des Magnetfeldes  $\vec{B}$  bezüglich der Flugrichtung des Vogels.

um aktiv zu sein. Das steht in gutem Einklang zu den Experimenten zur Lichtabhängigkeit des Magnetorezeptors: Die Vögel können sich nur dann problemlos in die populationsspezifische Zugrichtung orientieren, wenn man sie unter blauem, türkisfarbenem und grünem Licht testet [2, 4].

Die Aktivität vom Cryptochrom hängt sowohl von der Stärke des äußeren Magnetfeldes ab als auch von der Orientierung des Moleküls relativ zum Feldvektor, die sich durch die Feldstärke  $B_0$  sowie die beiden Winkel  $\Theta$  und  $\Phi$  beschreiben lassen (Abb. 4):

$$\vec{B} = (B_0 \sin \Theta \cos \Phi, B_0 \sin \Theta \sin \Phi, B_0 \cos \Theta).$$

Die Abhängigkeit der Aktivierungsrate des Cryptochroms von der Richtung und Stärke des externen Magnetfeldes lässt sich mit dem stochastisch-Liouville-Ansatz berechnen (Abb. 5) [10]. Eine Feldstärke von 0,5 G entspricht der typischen Erdmagnetfeldstärke. Die Aktivierungsrate ist gegeben durch die relative Wahrscheinlichkeit, dass sich der FAD-Chromophor im FADH<sup>\*</sup>-Zustand befindet (vgl. Abb. 3). Die Aktivie-

rungsrate vom Cryptochrom weist eine gewisse Symmetrie bezüglich der Winkel  $\Theta$  und  $\Phi$  auf, die genau der Symmetrie des Inklinationskompasses entspricht. Betrachten wir in Abb. 5 (für 0,5 G) den Referenzpunkt N, der der Richtung des Magnetfeldes bei einer ausgewählten Flugrichtung entspreche. Würde man in einem Experiment die vertikale Magnetfeldkomponente invertieren,

$$\vec{B}(\Theta, \Phi) \rightarrow \vec{B}(180^\circ - \Theta, \Phi),$$

so würde sich die Aktivierungsrate ändern (Punkt V), und der Vogel würde seine Zugrichtung ändern. Gleiches gilt bei Invertierung der horizontalen Magnetfeldkomponente (Punkt H),

$$\begin{aligned} \vec{B}(\Theta, \Phi) &\rightarrow \vec{B}(\Theta, -180^\circ + \Phi), \quad \Phi \geq 0 \\ &\vec{B}(\Theta, 180^\circ + \Phi), \quad \Phi < 0. \end{aligned}$$

Nur wenn beide Komponenten invertiert werden, bleibt die Aktivierungsrate unverändert (Punkt B).

Bei höheren Magnetfeldern treten gewisse Änderungen in der Aktivierungsrate auf, die in einem Zusammenhang mit experimentellen Befunden zur Magnetorezeption von Pflanzen stehen [10]. Diese weisen darauf hin, dass ein äußeres Magnetfeld die Pflanzenwachstumsrate beeinflussen kann.

### Der magnetische Schnabel

Das Verhalten von Vögeln und Tieren in der Nähe von Magnetfeldanomalien sowie deren Orientierungsfähigkeit im Dunkeln kann der Cryptochrom-Mechanismus allerdings nicht erklären. Vögel können noch in totaler Dunkelheit den Magnetfeldlinien nachfliegen. Dann verfügen sie nur noch über einen Magnetkompass, der wie ein gewöhnlicher Nadelkompass funktioniert und zwischen Nord- und Südpol unterscheidet [2]. Einige Tiere, z. B. Maulwürfe und Fische, besitzen ausschließlich einen Magnetkompass.

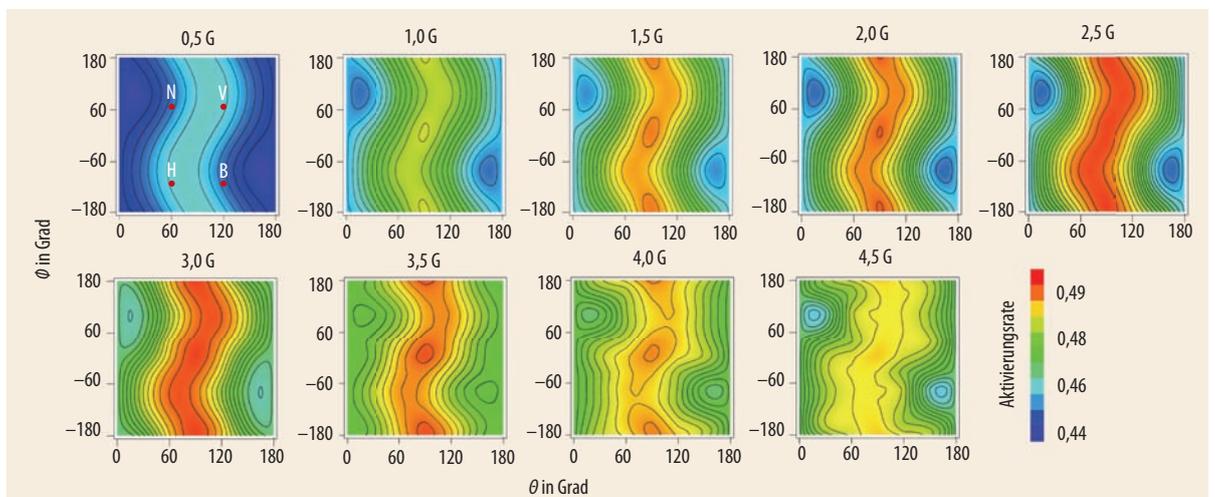


Abb. 5 Die Aktivierungsrate des Cryptochrom hängt vom externen Magnetfeld ab. Die Winkel  $\Theta$  und  $\Phi$  charakterisieren die Magnetfeldrichtung [10]. Die vier

Punkte bei 0,5 G markieren vier verschiedene Magnetfeldrichtungen: N ist der Referenzpunkt, der der Flugrichtung entspricht, H und V entsprechen der Inver-

tierung der horizontalen bzw. vertikalen Komponente des Magnetfeldvektors und B der Invertierung beider Komponenten.

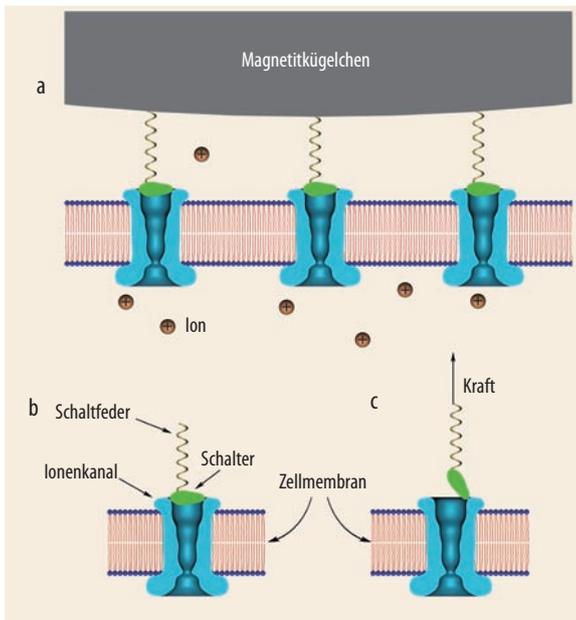


Abb. 6 Magnetitkugeln in Dendriten koppeln an die Nervenzellmembran (a) und können die normalerweise geschlossenen Ionenkanäle (b) öffnen (c).

Für die Wahrnehmung von magnetischen Anomalien besitzt das Magnetsinnorgan von Vögeln einen zweiten Apparat, der sich im Schnabel befindet. Mithilfe von Gewebeuntersuchungen am Hamburger Synchrotronlabor Hasylab entdeckten Gerta Fleissner von der Universität Frankfurt und ihre Kollegen im Oberschnabel von Brieftauben winzige Kügelchen aus eisenhaltigem Magnetit und kleine Plättchen aus dem ebenfalls eisenreichen Mineral Maghemit. Die Mineralien finden sich in fein verästelten Nervenansätzen (Dendriten), die in einem komplexen dreidimensionalen Muster angeordnet sind, sodass die Tiere Richtung und Stärke des Erdmagnetfeldes messen können (Abb. 2b).

Die Magnetitkugeln in den Dendriten sind mit mehreren Ionenkanälen in der Nervenzellmembran verbunden (Abb. 6). Diese kontrollieren den Ionenstrom durch die Membran und sind dafür verantwortlich, wie häufig der jeweilige Dendrit Nervenimpulse in das Gehirn sendet. Unter Normalbedingungen sind die meisten Ionenkanäle geschlossen. Ändert sich jedoch das Magnetfeld, dann üben die Magnetitkugeln auf die Membran eine Kraft aus. Dadurch öffnen sich einige Ionenkanäle, und der Ionenstrom durch die Membran steigt an [16].

Bislang gibt es noch keine präzisen Messungen, die eindeutig zeigen, wie die magnetischen Strukturen im Schnabel angeordnet sind [17]. Daher ist es auch nicht möglich, die Kräfte genauer zu bestimmen, die auf die Zellmembran wirken. Die niedrigsten Kräfte, die in Schnabdendriten zu erwarten sind, lassen sich zumindest abschätzen (Abb. 7). Bei einer Drehung um 180 Grad ändert sich die Kraft, die im Erdmagnetfeld auf die Zellmembran wirkt, demnach um 0,4 pN [14, 15]. Diese Änderung scheint in üblichen Maßstäben klein zu sein, kann aber z. B. die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Ionenkanal öffnet, um 30 Prozent ändern

[14]. Je nach der Größe der magnetischen Strukturen im Schnabel und ihrer Anordnung können die erzeugten Kräfte fünf- bis zehnmals so groß sein [16].

Bei der Kraft, die auf die Zellmembran des Dendriten wirkt, ist eine Symmetrie zu erkennen, die zeigt, dass das Magnetsinnorgan im Schnabel einen Magnetkompass bildet (Abb. 7): Im Gegensatz zum Inklinationskompass bleibt das Signal (die Kraft auf die Zellmembran der Dendriten) nun unverändert bei Invertierung der vertikalen Magnetfeldkomponente (Punkt N → Punkt V). Wie beim Inklinationskompass ändert sich das Signal bei Invertierung der horizontalen Komponente des Magnetfeldvektors (Punkt H), während es bei Invertierung beider Komponenten (Punkt B) unverändert bleibt.

### Auge oder Schnabel?

Je nachdem, ob Tiere den Inklinations- oder den Magnetkompass nutzen, verhalten sie sich unterschiedlich bei der Invertierung von Komponenten des Magnetfelds. Dabei ist die vertikale Komponente entscheidend. Folgen die Tiere dem Inklinationskompass, sollten sie sich bei einer solchen Feldtransformation um 180° wenden, obwohl der Magnetkompass weiter in dieselbe Richtung zeigt. Bei der Invertierung der horizontalen Komponenten des Magnetfeldvektors sollten sich die Tiere in beiden Fällen um 180° wenden [2].

Experimentelle Befunde [1] und unsere Rechnungen [9–16] weisen darauf hin, dass der Cryptochrom-Mechanismus vermutlich für den Inklinationskompass verantwortlich ist, der wichtig ist für die Langstreckenflüge, bei denen der Vogel die grobe Flugrichtung benötigt. Die magnetischen Teilchen im Schnabel ermöglichen hingegen das Ablesen von kleinen Feldänderungen und sind somit für die lokale Navigation bedeutend. Auch der Sicherheitsfaktor spielt hier eine wichtige Rolle: Wenn einer von den beiden

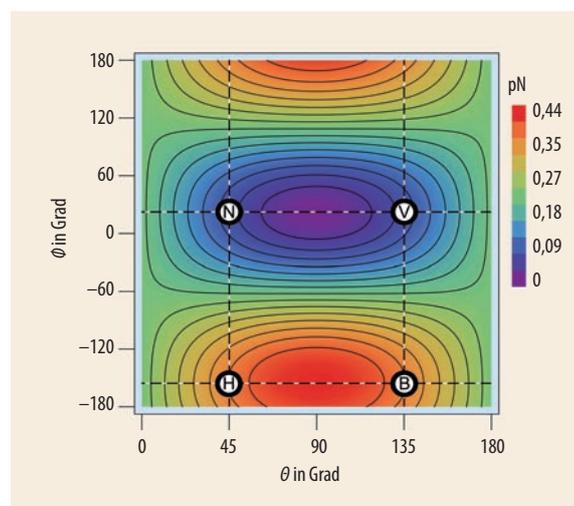


Abb. 7 Die Kraft, die auf die Zellmembran des Dendriten wirkt, als Funktion der Richtung des Erdmagnetfeldvektors. Die Winkel  $\theta$  und  $\phi$  charakterisieren die Magnetfeldrichtung. Die vier Punkte markieren wie in Abb. 5 vier verschiedene Richtungen des Magnetfeldvektors [14].

Mechanismen ausfällt, kann der zweite Mechanismus das Magnetfeld immer noch registrieren und dem Tier den Weg weisen.

Zurzeit gibt es zwei Experimente, die zwischen den beiden Mechanismen unterscheiden können. Setzt man Vögel einem Magnetfeld aus, das mit Radiofrequenz oszilliert, so scheinen sie bei bestimmten Feldfrequenzen den Kompassinn zu verlieren. Dies deutet auf den Radikalpaarmechanismus hin [18]. In starken Magnetfeldern werden die Vögel unruhig, was man durch die Störungen des Magnet-sinnesorgan im Schnabel erklären kann [19]. Allerdings sind diese Versuche noch nicht eindeutig genug.

In Zukunft wird es darum gehen, experimentelle Befunde über den Magnetsinn der Vögel für ein möglichst vollständiges Modell zu nutzen, mit dem sich die Vielseitigkeit des Magnetsinnes erklären lässt. Noch gilt es, wichtige Fragen zu beantworten: In welchen Zellen ist Cryptochrom im Auge zu finden? Wie fest ist Cryptochrom an der Zellmembran angebunden? Wie viele Magnetitplättchen gibt es im Schnabel überhaupt? Sind alle Plättchen genau gleich (quadratisch oder gestreckt)? Üben weniger Plättchen ein wesentlich anderes Verhalten im Magnetfeld aus? Wie wachsen diese bei Jungvögeln und wie sieht ihre Häufigkeitsverteilung aus?

Mit Methoden der Neurochirurgie lassen sich die zwei Mechanismen bei Zugvögeln möglicherweise separat untersuchen und somit ihre Funktionen besser verstehen. Schließlich wäre das berühmte Brieftaubenexperiment, wonach verdeckte Tauben nach langem Transport ohne weiteres wieder zurückfinden, mit der Speicherung der magnetischen Landkarte leicht verständlich. Magnetisch abgeschirmte Tauben sollten demnach nicht wieder nach Hause finden. Auch dafür steht die experimentelle Verifikation noch aus.

### Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Stiftung Polytechnische Gesellschaft Frankfurt am Main unterstützt, mit den Grants NSF MCB-0744057 und NSF PHY0822613 sowie von der Alexander von Humboldt-Stiftung (Research Award an K. S.). Wir danken Axel Arnold und Elena Solovyeva für viele kritische Bemerkungen und für nützliche Diskussionen.

### Literatur

- [1] M. Zapka, D. Heyers, C. M. Hein, S. Engels, N.-L. Schneider, J. Hans, S. Weiler, D. Dreyer, D. Kishkinev, J. M. Wild und H. Mouritsen, *Nature* **461**, 1274 (2009)
- [2] R. Wiltschko und W. Wiltschko, *BioEssays* **28**, 157 (2006)
- [3] S. Johnsen und K. J. Lohmann, *Physics Today* **61**, 29 (2008)
- [4] W. Wiltschko, U. Munro, H. Ford und R. Wiltschko, *Nature* **364**, 525 (1993)
- [5] H. Mouritsen und T. Ritz, *Curr. Opin. Neurobiol.* **15**, 406 (2005)
- [6] K. E. O'Day, *PLoS Biol.* **6**, 1359 (2008)
- [7] G. Fleissner, B. Stahl, P. Thalau, G. Falkenberg und G. Fleissner, *Naturwissenschaften* **94**, 631 (2007)

- [8] M. Winklhofer, *Physik unserer Zeit* **35**, 120 (2004)
- [9] T. Ritz, S. Adem und K. Schulten, *Biophys. J.* **78**, 707 (2000)
- [10] I. A. Solov'yov, D. Chandler und K. Schulten, *Biophys. J.* **92**, 2711 (2007)
- [11] I. A. Solov'yov und K. Schulten, *Biophys. J.* **96**, 4804 (2009)
- [12] I. A. Solov'yov, D. E. Chandler und K. Schulten, *Plant Signaling & Behavior*, **3**, 676-677 (2008)
- [13] M. Liedvogel, K. Maeda, K. Henbest, E. Schleicher, T. Simon, C. R. Timmel, P. J. Hore und H. Mouritsen, *PLoS ONE* **2**, e1106 (2007)
- [14] I. A. Solov'yov und W. Greiner, *Biophys. J.* **93**, 1493 (2007)
- [15] I. A. Solov'yov und W. Greiner, *Eur. Phys. J. D* **51**, 161 (2009)
- [16] I. A. Solov'yov und W. Greiner, *Phys. Rev. E* **80**, 041919 (2009)
- [17] G. Falkenberg, G. Fleissner, K. Schuchardt, M. Kuehbacher, P. Thalau, H. Mouritsen, D. Heyers, G. Wellenreuther und G. Fleissner, *PLoS ONE* **5**, e9231 (2010)
- [18] T. Ritz, R. Wiltschko, P. J. Hore, C. T. Rodgers, K. Stapput, P. Thalau, C. R. Timmel und W. Wiltschko et al., *Biophys. J.* **96**, 3451 (2009)
- [19] W. Wiltschko und R. Wiltschko, *J. Comp. Physiol. A* **191**, 675 (2005)

### DIE AUTOREN

**Ilia A. Solov'yov** studierte Physik in Frankfurt und St. Petersburg. 2008 promovierte er mit einer am am Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) angefertigten Arbeit zu Magnetorezeptionsmechanismen von Vögeln. Ein Jahr später erhielt er einen zweiten Doktorgrad vom A. F. Ioffe Institut in St. Petersburg mit einer Arbeit über Nanostrukturen. Er ist Stipendiat der Polytechnischen Gesellschaft, Frankfurt / M.



**Klaus Schulten** ging nach dem Physikstudium in Münster nach Harvard. 1974 nahm er eine Gruppenleiterstelle am MPI für biophysikalische Chemie in Göttingen an. 1980 habilitierte er und erhielt einen Ruf an die TU München. 1988 ging er an die University of Illinois in Urbana-Champaign, wo er noch heute lehrt und forscht. Dort gründete er das Center for Theoretical and Computational Biophysics und das Center for the Physics of Living Cells, denen er als Direktor bzw. Kodirektor vorsteht. Schulten beschäftigt sich mit supramolekularen Komplexen biologischer Zellen sowie der Rolle der Quantenphysik in biologischen Prozessen.



**Walter Greiner** (FV Hadronen und Kerne) studierte Physik in Frankfurt und Darmstadt. Nach seiner Promotion 1961 an der Universität Freiburg war er bis 1964 Assistent Professor an der University of Maryland. 1964 wurde er als Ordinarius an das Institut für Theoretische Physik der Universität Frankfurt berufen, dessen Direktor er bis 1995 war. Greiners Arbeitsgebiete liegen in der Kern-, Teilchen-, Schwerionen- sowie Atomphysik. Er war Mitinitiator der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt, hat u. a. eine Lehrbuchreihe zur theoretischen Physik geschrieben. Sein dreibändiges Werk mit Judah Eisenberg über theoretische Kernphysik ist ein Klassiker. Er ist Träger zahlreicher wissenschaftlicher Auszeichnungen. Nach seiner Emeritierung 2003 gründete Greiner 2004 auf Anregung von Rudolf Steinberg zusammen mit Wolf Singer das FIAS.

