

Viele Tiere orientieren sich am natürlichen Magnetfeld der Erde. Sie verfügen über eine Art inneren Kompass, mit dem sie die Feldlinien des Erdmagnetfelds wahrnehmen und ihre Reiseroute entsprechend anpassen können. Der Biogeophysiker Dr. Michael Winklhofer untersucht, wie Tiere das Magnetfeld aufnehmen und in für sie sinnvolle Informationen umwandeln können.

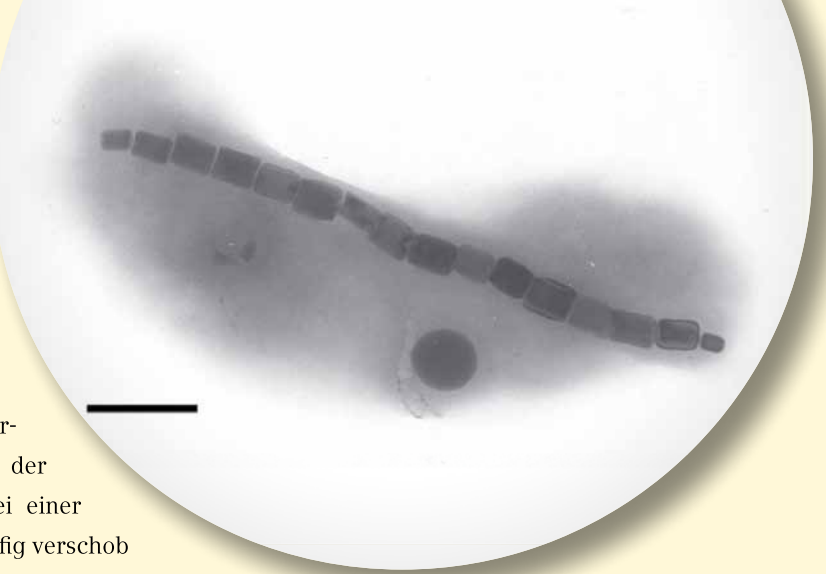
MARIEKE DEGEN

DER MAGNETSINN ZEIGT DEN WEG

Sie schlüpfen in den Gebirgsflüssen Alaskas, und ihre Kindheit ist alles andere als idyllisch. Mit aller Kraft stemmen sie ihre jungen Körper gegen die Strömung, um nicht aus ihrer Kinderstube fortgerissen zu werden. Doch dann fangen sie an zu wachsen. Ihr dunkelblau-gestreiftes Schuppenkleid verwandelt sich in ein schillerndes Silber. In den Bergen hält sie dann nichts mehr. Lachse sind Abenteurer, oder biologisch korrekt: Wanderfische. Jedes Frühjahr lassen sich ganze Schwärme von Jungtieren stromabwärts zur Pazifikküste treiben; von dort geht es noch mal dreitausend Kilometer in Richtung Norden, ins Schlaraffenland vor die Küsten Grönlands. Jahre später kehren sie dann, fettgefressen und paarungsbereit, in ihre heimatlichen Gebirgsbäche zurück, wo sie ihren Laich ablegen und erschöpft von der langen Reise sterben. Eines ist klar: Wer so einen Trip ohne größere Irr- und Umwege meistert, muss mit einem perfekten Orientierungssinn ausgestattet sein. Biologen gehen davon aus, dass sich Lachse nach dem Stand der Sonne richten, nachts nach den Gestirnen. Die Fische sind außerdem mit einem extrem empfindlichen Geruchssinn gesegnet. Den Duft ihrer Heimatgewässer, eine ganz besondere Mischung aus Pflanzenresten und Sedimenten, nehmen sie wahrscheinlich schon aus mehreren hundert Kilometern Entfernung wahr. Und: Lachse orientieren sich am natürlichen Magnetfeld der Erde. Sie scheinen einen sechsten Sinn zu haben, eine Art inneren Kompass, mit dem sie die Feldlinien des Erdmagnetfelds wahrnehmen und ihre Reiseroute entsprechend anpassen können. „Wir können die Schwimmrichtung von Fischen im Labor mit künstlichen Magnetfeldern beeinflussen“ sagt Dr. Michael Winklhofer von der LMU. „Die Frage ist nur: Was genau passiert dabei?“ Der Biogeophysiker fahndet nach den Antennen im Fischkörper, die das Magnetfeld der Erde auffangen und in für die Tiere sinnvolle Informationen umwandeln können. Zusammen mit seinen Kollegen will er das Rätsel lösen, für das sich Biologen seit Jahrzehnten brennend interessieren.

Zugvögel fliegen zweimal jährlich um den halben Erdball und wählen dabei fast immer dieselben Routen und Rastplätze. Grauwale leben den Sommer über im Nordpazifik, bringen im Winter ihre Jungtiere aber vor den Küsten Mexikos zur Welt – 15.000 Kilometer legen sie dabei pro Jahr zurück. Und auch die Suppenschildkröte paddelt zielsicher tausende von Kilometern weit, um ihre Eier auf ausgewählten Brutplätzen abzulegen. Genau wie bei Lachsen besteht auch ihr Orientierungsvermögen wahrscheinlich aus mehreren Komponenten: eine gute Sicht, ein empfindliches Gehör, eine feine Nase. „Doch auch das Erdmagnetfeld scheint eine wichtige Rolle zu spielen“, sagt Michael Winklhofer. Seit einem halben Jahrhundert versuchen Verhaltensforscher, dem Magnetsinn der Tiere auf die Schliche zu kommen. Sie befestigten kleine Stabmagneten im Nacken von Brieftauben; die so manipulierten Tiere

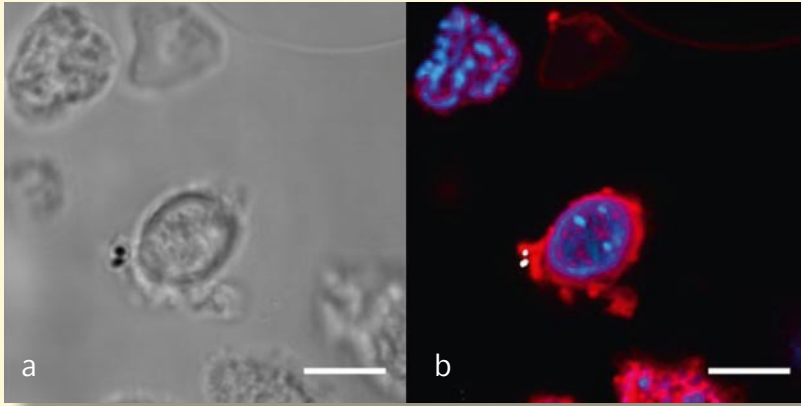
► Elektronenmikroskopische Aufnahme eines magnetischen Bakteriums (Maßstabsbalken: 0,2 µm). Deutlich zu erkennen ist die sogenannte Magnetosomenkette, bestehend aus intrazellulär mineralisierten Magnetit-Kristallen. Sie verleiht dem Einzeller ein permanentes magnetisches Dipolmoment, das ihn am Erdmagnetfeld ausrichtet. Dies ermöglicht es dem magnetischen Bakterium, sich entlang der Magnetfeldlinien geradlinig durchs Wasser fortzubewegen.



waren sichtlich desorientiert und hatten größere Probleme, wieder nach Hause zu finden. Sie sperrten Rotkehlchen in einen abgedunkelten Käfig, der von Helmholtz-Spulenpaaren umgeben war. Bei einer Verschiebung des künstlichen Magnetfelds im Käfig verschob sich die Abflugrichtung der kleinen Vögel entsprechend. Vor allem in Freilandexperimenten haben Forscher immer wieder zeigen können, dass sich die Tiere bis zu einem gewissen Grad am Erdmagnetfeld orientieren. „Die Schwierigkeit bei Freilandexperimenten ist aber, dass man andere Sinne nicht ausschalten kann“, sagt Michael Winklhofer. Im Labor sei das schon schwierig genug. Der Geophysiker spricht aus Erfahrung: Er wollte testen, wie sich Hummer im Magnetfeld verhalten. Dass sich ihre Verwandten, die Langusten, in der freien Wildbahn auf ihren Magnetsinn verlassen, gilt nämlich als relativ gesichert. Das künstliche Magnetfeld im Labor hat Michael Winklhofers Krustentier aber völlig kaltgelassen. „Wahrscheinlich hat es das Brummen der Wasserpumpe am Tank irritiert.“ Verhaltensexperimente liefern den Forschern auch keine Erkenntnisse darüber, wie der Magnetsinn im Detail funktioniert. Michael Winklhofer verfolgt deshalb eine andere Strategie. Wenn sich die Tiere am Erdmagnetfeld orientieren, dann müssen sie eine Art sechsten Sinn besitzen, mit dem sie das Magnetfeld erspüren können: spezielle Magnetsinneszellen. Wie sind sie aufgebaut? Funktionieren sie bei allen Tieren nach dem gleichen Schema? Und wie wandeln sie die magnetische Energie in einen Nervenimpuls um? „Bislang hat noch keiner diese Zellen zweifelsfrei identifizieren können“, sagt er. Aber ein paar Fragen kann der Münchner heute schon beantworten.

AUCH DIE TAUBE WIRD DURCH DEN MAGNETSINN GELENKT

Die Faszination Magnetsinn packte Michael Winklhofer bereits vor 15 Jahren. Schon damals interessierte er sich für das Erdmagnetfeld – und für ganz spezielle Bakterien. Sie mögen es sauerstoffarm, leben in der Sedimentschicht am Boden von Seen oder Meeren. Das Besondere an ihnen: Sie sind magnetisch, denn sie mineralisieren in ihrem Zellkörper winzige Kristalle aus Magnetit, dem wichtigsten magnetischen Mineral, welches in der unbelebten Natur vor allem in magmatischen Gesteinen vorkommt. Im Zellkörper der Bakterien liegen die Magnetitkristalle kettenförmig aneinander, sodass sie zusammen wirken können wie ein vergleichsweise starker Magnet. „Diese sogenannten Magnetosomen fungieren als Kompassnadel und richten die Zelle immer am Erdmagnetfeld aus“, erklärt der Biogeophysiker. Während sich andere Bakterien zickzackförmig umherbewegen, schießen die von den Magnetfeldlinien geführten Bakterien geradlinig und zielsicher durch ihr Habitat. Der Einstieg in die Erforschung des Magnetsinns von Tieren begann für Michael Winklhofer mit einer Anfrage von Wolfgang Wiltschko, einem Ornithologen an der Universität Frankfurt und Pionier bei der Erforschung des Magnetsinns. Dieser hat herausgefunden, dass er den Magnetsinn bei Tauben lahmlegen kann, indem er ihre Schnäbel betäubt; und er hat gehört, dass die Münchner Geophysiker mit einem hochempfindlichen Magnetometer auch geringste Mengen magnetischen Materials aufspüren können. Michael Winklhofer und dessen Doktorvater, Professor Nikolai Petersen, vermessen daraufhin die magnetischen Eigenschaften der Schnäbel. Im oberen Teil des Schnabels ist die Konzentration magnetischen Materials auffallend hoch. Seine Kollegin Marianne Hanzlik sieht sich die Schnabelregionen daraufhin unter dem Elektronenmikroskop an. Und tatsächlich: Bei hunderttausendfacher Vergrößerung entdecken sie winzige, wenige Nanometer große Magnetitkristalle in den Endigungen der Nervenzellen. Sie sind damit etwa zehnmal kleiner, wenngleich



◀ Isolierte Magnetrezeptor-Zelle aus dem Geruchsorgan der Regenbogenforelle (Maßstabsbalken: 10 µm). Im Durchlichtmikroskop erscheinen bei a die Magnetit-Einlagerungen als schwarze Punkte am linken Rand der in der Bildmitte gelegenen Zelle, während sie in b unter dem konfokalen Laserscanning-Mikroskop (Auflicht) als stark reflektierende Partikel (weiß) hervortreten. Konfokale fluoreszenzmikroskopische Bilder zur Visualisierung von Zellbestandteilen sind dem Auflichtbild überlagert. Die violetten Bereiche markieren die DNA im Zellkern, der rote Saum stellt die Plasmamembran dar.

auch zahlreicher als bei magnetischen Bakterien, und sie sind auch nicht zu Magnetosomenketten angeordnet. In seiner Dissertation führt Michael Winklhofer aber theoretisch aus, dass sich die magnetischen Strukturen prinzipiell als Magnetfeldsensoren eignen, und damit sind diese Nervenendigungen ein erster heißer Kandidat für die lange gesuchte Magnetsinneszelle.

Heute arbeitet der Geophysiker hauptsächlich mit Fischen. Er hat sich mit Kollegen aus Cambridge, Auckland und dem California Institute of Technology zusammengetan. Gemeinsam haben sie bei der Human Frontier Science Organisation ein Verbundprojekt eingeworben, um Struktur und Funktion des Magnetsinns in Fischen zu untersuchen. Michael Winklhofers Aufgabe im Team ist es, die Zellen magnetisch zu charakterisieren. „Das magnetische Dipolmoment ist hier die maßgebliche Größe, denn sie bestimmt die Empfindlichkeit des Magnetsinns auf Feldänderungen und damit letztlich die Genauigkeit, mit der die einzelne Zelle das Magnetfeld detektieren kann.“ Bei den Regenbogenforellen – den engen Verwandten der wanderfreudigen pazifischen Lachse – sitzen die magnetit-haltigen Nervenzellen in der Nase, genauer in den olfaktorischen Lamellen der Nasengrube. „Überraschenderweise sind die Magnetite in Forellen denen von magnetischen Bakterien viel ähnlicher als denen von Brieftauben“, berichtet er. Um die Eigenschaften der magnetischen Zellen genauer zu untersuchen, muss er sie zunächst aus den Lamellen isolieren. Er löst das Bindegewebe mit Enzymen auf, legt die suspendierten Zellen unter sein mit Magnetspulen versehenes Mikroskop und lässt das künstliche Magnetfeld einfach rotieren. „Die magnetischen Zellen drehen sich dann ebenfalls“, sagt Michael Winklhofer – genau wie magnetische Bakterien. „Und aus dem Drehverhalten lässt sich das magnetische Dipolmoment errechnen.“ Aber: Der Magnetismus der Fisch-Zellen sei zehnmal stärker als bei den Einzellern. „Wir kennen also mittlerweile die fundamentale magnetische Kenngröße der Kompassnadel in der Zelle.“ Wie das magnetische Signal nach dessen Aufnahme letztlich in einen Nervenreiz umgewandelt wird, darüber können er und seine Kollegen derzeit aber nur Vermutungen anstellen. Was sie wissen: Das Magnetfeld übt auf die Magnetitkristalle ein Drehmoment aus. Die Zellen selbst drehen sich nicht, sie sind bei lebendigen Forellen fest im Gewebe integriert. Möglicherweise sind die Magnetitkristalle über ganz feine Fasern mit der Membran der Nervenzellen verbunden. Selbst wenn sich die Kristalle nur minimal am Erdmagnetfeld ausrichten, würden sie leicht an den Fasern ziehen und damit einen Reiz an der Membran der Nervenzelle auslösen. Das magnetische Signal würde dort in ein elektrisches umgesetzt; ein sogenanntes Aktionspotential entsteht, das bis zum Gehirn weitergeleitet wird.

DAS ERDMAGNETFELD WIRD ERTASTET

Michael Winklhofers Projektpartner aus Cambridge haben immerhin schon erste Hinweise darauf gefunden, dass an den magnetit-haltigen Zellen tatsächlich ein Nervenreiz entsteht. Auch sie haben einzelne Zellen im künstlichen Magnetfeld beobachtet und festgestellt, dass sich im Zuge einer Veränderung des Magnetfelds die Calciumkonzentration innerhalb der Nervenzelle ebenfalls verändert hat. „Das deutet auf die Entstehung eines Aktionspotentials hin.“ Sicher ist auch: Obwohl der Magnetsinn bei Forellen in der Nase lokalisiert ist, können die Tiere das Erd-

magnetfeld nicht riechen. „Die magnetischen Zellen leiten die Reize nicht an den Geruchsnerve weiter, sondern an den *Nervus trigeminus*, den Gesichtsnerv.“ Dieser Nerv registriert auch Druck. Die Tiere würden die Veränderungen im Erdmagnetfeld also gleichsam ertasten. Die Kompassnadeln aus Magnetit haben immer die Tendenz, sich nach magnetisch Nord auszurichten. Ist der Fisch in eine andere Richtung orientiert, lösen die Kompassnadeln eine Art Druckreiz aus, der umso heftiger ausfällt, je größer die Abweichung von der Nordrichtung ist. „Der Fisch könnte über das richtungsabhängige Reizmuster also immer seine aktuelle Ausrichtung bezüglich magnetisch Nord bestimmen“, sagt Michael Winklhofer. „Es ist schwer, sich das als Mensch vorzustellen, da wir keinen Magnetsinn haben.“ Der Magnetsinn lässt sich wohl am ehesten mit unserem Gleichgewichtssinn vergleichen, der dem Gehirn meldet, wenn sich die aktuelle Position unseres Kopfes ändert.

Viele Aspekte des Magnetsinns bleiben noch ungeklärt. Michael Winklhofer spornt das nur zusätzlich an: „Man muss sich vor Augen halten, dass es sich hierbei um ein relativ junges Forschungsfeld handelt, man kann also noch Grundlegendes entdecken. Das betrifft nicht nur die Biophysik des Magnetsinns selbst, sondern auch die Biomineralisation von Magnetit in Fischen und Vögeln.“ Als nächstes will er ergründen, wie die Fische die relativ großen Magnetit-Kristalle in ihren Zellen überhaupt bilden. Seine Versuchstiere sollen dann Zebrafische sein. Sie können auf magnetische Reize konditioniert werden, und auch bei ihnen finden sich Magnetit-haltige Zellen in der Nasengrube. Im Gegensatz zu anderen Fischen ist ihr Erbgut aber komplett entschlüsselt, und so lassen sich vielleicht durch Untersuchungen an Mutantenlinien die Gene identifizieren, welche die Magnetitproduktion steuern. „Die Biomineralisation von Magnetit im Tierreich lässt sich stammesgeschichtlich mindestens bis zu den primitivsten Mollusken, den Käferschnecken, zurückverfolgen und so ist es denkbar, dass sich der Magnetsinn schon ganz früh in der Evolution herausgebildet hat.“ Vielleicht erklärt das auch, warum er heute noch in den verschiedensten Tiergruppen einschließlich den Säugern zu finden ist. So haben deutsche und tschechische Biologen vor kurzem berichtet, dass sich Hirsche und Rinder entlang einer magnetischen Nord-Süd-Achse auf die Weide stellen – die Forscher hatten dafür Satellitenbilder ausgewertet. In der Nähe von Hochspannungsleitungen standen die Tiere dagegen kreuz und quer. Auch Fledermäuse verlassen sich auf ihren nächtlichen Touren offenbar auf einen inneren Magnetkompass, den sie wie nachziehende Singvogelarten an der untergehenden Sonne kalibrieren. Sogar der Nacktmull, ein haarloses Nagetier aus den Halbwüsten Ostafrikas, richtet seine unterirdischen Höhlensysteme an der magnetischen Nord-Süd-Achse aus. Michael Winklhofer hat gleich mal Proben vom Gehirn und vom Gesichtsnerv der Nager vermessen, die ihm ein Kollege aus Prag geschickt hat. Sie waren nur schwach magnetisch, enthielten nur Spuren von Magnetit. „Das heißt aber noch gar nichts“, meint er. Für einen einfachen Kompass reiche die Menge vielleicht schon aus. Die Suche nach dem sechsten Sinn geht weiter.

PD Dr. Michael Winklhofer promovierte im Jahr 1999 an der LMU. Nach Forschungsaufenthalten in England und den USA ist er seit 2003 wieder am Department für Geo- und Umweltwissenschaften. Im Jahr 2008 erhielt er ein Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft.
michaelw@lmu.de
<http://www.geophysik.uni-muenchen.de/Members/michael>

