

Der Magnetkompass der Zugvögel

Von Julia Stalleicken und Henrik Mouritsen

Verhaltensversuche haben die Rolle des Magnetsinns für die Kompassorientierung der Zugvögel enthüllt, aber die physiologischen Grundlagen sind immer noch ein Rätsel. Die Mechanismen der Magnetfeldwahrnehmung - vom Rezeptormolekül bis zur Verarbeitung der Magnetinformation im Gehirn - sind ein Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Animal Navigation.



Zugvögel besitzen ein fantastisches Orientierungsvermögen, dem die Wissenschaft nach und nach auf die Spur kommt.

Behavioural experiments have proven the importance of the magnetic sense for compass orientation in migratory birds, but its physiological basis is still an enigma. Understanding the mechanisms of magnetoreception - from the primary receptor molecule to the processing of magnetic information in the brain - is a major focus of the AG Animal Navigation.

Was jetzt, Richtung Dortmund oder Duisburg???? Die Autobahnauffahrt rückt bedrohlich näher, der Fahrer schwitzt beim Anblick der Autoschlange im Rückspiegel, der Beifahrer flucht über der Straßenkarte - kommt Ihnen das irgendwie bekannt vor? Verlassen wir unsere heimischen Gefilde, geht unsere Orientierung meist schnell verloren. Hilflos klammern wir uns in der Fremde an den Michelin-Atlas oder liefern uns resigniert dem Autonavigationssystem aus. Milliarden von Zugvögeln dagegen gelingt jedes Jahr spielend, woran wir, selbst technisch aufgerüstet, oft kläglich scheitern. Besonders auf der ersten Wanderung in die Überwinterungsgebiete beweist der Nachwuchs vieler Arten ein fantastisches Orientierungsvermögen. Völlig auf sich gestellt, müssen z.B. junge Rotkehlchen oder Gartengrasmücken ganz auf ihr eigenes Kompasssystem vertrauen, wenn sie ihrer angeborenen Zugrichtung folgend ins Unbekannte fliegen.

Mit Netz und doppeltem Boden

Die drei wichtigsten Kompasssysteme der Zugvögel, der Sonnen-, Sternen- und Magnetkompass, werden seit ca. 40 Jahren

systematisch erforscht. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Magnetkompass der Zugvögel anders arbeitet als unser technischer Kompass: Die Vögel bestimmen mit ihrem Kompass den Neigungswinkel der Magnetfeldlinien relativ zur Erdoberfläche, die so genannte Inklinationskompass unterscheidet nicht zwischen magnetischem Nord- und Südpol, sondern zwischen 'polwärts' (am Pol stechen die Magnetfeldlinien senkrecht in den Boden) und 'äquatorwärts' (am Äquator verlaufen sie genau parallel zur Erdoberfläche). Neben der Funktionsweise jedes einzelnen Kompasses interessiert die Vogelforscher besonders, ob und wie die verschiedenen Mechanismen miteinander interagieren und welche relative Bedeutung sie für die Zugorientierung haben. Im Labor durchgeführte Konflikt-Versuche, bei denen z. B. das (manipulierte) Magnetfeld andere Richtungsinformationen als Sonne oder Sterne liefert, haben gezeigt, dass Zugvögel nicht wahllos mal zum einen, mal zum anderen Kompass greifen. Stattdessen scheinen alle zur Verfügung stehenden Orientierungsmechanismen in ein komplexes System integriert und regelmäßig neu aufeinander abgestimmt zu werden. Fällt

In der ersten Nacht nach der ‚Magnetfeldbehandlung‘ zogen die Catharus-Drosseln Richtung Westen (rote Linien). Erst nachdem sie ihren Magnetkompass am folgenden Abend bei Sonnenuntergang wieder korrekt eichen konnten, kehrten die Vögel zu ihrer alten Zugrichtung zurück (gelbe Linien).
Verändert nach Science 304: 405-408.



Versuche in freier Wildbahn

Um das Geheimnis zu lüften, haben wir in Kooperation mit William Cochran vom Illinois Natural History Survey und Martin Wikelski von der Universität Princeton unsere Versuche vom Labor in die freie Wildbahn verlegt: Im US-Bundesstaat Illinois fingen wir im Frühsommer nach Norden wandernde Catharus-Drosseln. Wie die meisten Singvögel zieht diese nordamerikanische Art überwiegend bei Nacht und kann - unter Laborbedingungen - sowohl Sonne und

ein Mechanismus aus, können die anderen sofort übernehmen - Kompassorientierung mit Netz und doppeltem Boden.

Die vielfältigen Umweltreize, die wild lebenden Zugvögeln beim Navigieren in freier Natur zur Verfügung stehen, sind allerdings zu komplex, um sie vollständig im Labor zu simulieren. Deshalb sind viele Feinheiten von Funktion und Zusammenspiel der verschiedenen Kompassmechanismen, z.B. ihre ‚Hierarchie‘ innerhalb des Kompasssystems, bis heute unbekannt. Eines der klassischen Rätsel des Vogelzuges ist, wie Milliarden von Vögeln auf ihren Wanderungen ohne Zeichen von Desorientierung den Äquator überqueren: Da, wie gesagt, die Magnetfeldlinien hier genau parallel zur Erdoberfläche verlaufen, wird der Magnetkompass der Zugvögel beim Überfliegen zweideutig - ‚polwärts‘ liefert hier keine eindeutige Richtungsinformation mehr. Und, schlimmer noch, sind die Vögel auf der Südhalbkugel angekommen, neigen sich die Magnetfeldlinien in Richtung Südpol - was auf der Nordhalbkugel ‚Norden‘ anzeigte, bedeutet jetzt plötzlich ‚Süden‘. Dennoch kehrt kein Zugvogel verunsichert um, und es kreisen keine verwirrten Vogelschwärme über dem Äquator. Der Vorzeichenwechsel des Magnetkompasses scheint sich im Gegenteil völlig unproblematisch zu vollziehen. Wie kann das sein?

Erdmagnetfeld zur Kompassorientierung nutzen. Während die Drosseln am Abend nach dem Fang den Sonnenuntergang beobachteten, manipulierten wir das Magnetfeld um ihren Käfig mit Magnetfeldspulen, indem wir den Nordpol künstlich nach Osten verschoben. Mit einem Radiosender ausgerüstet wurden die Vögel anschließend einzeln in die Freiheit entlassen und setzten ihre Wanderung meist noch in derselben Nacht fort - im Schlepptau unser Team in einem 1982er Oldsmobil mit einer Richtantenne auf dem Dach, die das Funksignal vom Radiosender auf dem Rücken der Vögel auffing. Auf den scheinbar endlosen, schnurgeraden Straßen, die das flache Farmland Illinois wie ein regelmäßiges Gitter zerschneiden, konnten wir so den Zugweg der Drosseln über 1000 km weit verfolgen. Wie sich zeigte, flogen die Vögel in der ersten Versuchsnacht nach Westen anstatt nach Norden, erst in der zweiten Nacht kehrten sie wieder zu ihrer ursprünglichen Zugrichtung zurück.

Dieses Experiment legt nahe, dass Catharus-Drosseln, wie vermutlich die meisten Zugvögel, ihren Magnetkompass als Hauptkompass zur nächtlichen Orientierung nutzen. Allerdings auf ganz andere Art, als man bisher aufgrund von Laborexperimenten vermutet hat: In freier Wildbahn dient die Richtung des magnetischen Pols nicht als starre Referenzrichtung für die Zugorien-

terung - in diesem Fall hätte das kurzfristig bei Sonnenuntergang manipulierte Magnetfeld die Catharus-Drosseln kaum eine ganze Nacht lang aus der Bahn geworfen. Stattdessen wird der Magnetkompass unter natürlichen Bedingungen kurz vor Abflug anhand der Richtung des Sonnenuntergangs im Westen neu geeicht. Die ‚Fehleichtung‘ im manipulierten Magnetfeld hat dazu geführt, dass die Vögel eine Nacht lang das natürliche Magnetfeld falsch interpretierten - bis sie beim nächsten Sonnenuntergang ihren Kompass wieder richtig ‚einnorden‘ konnten. Da die Sonne immer ungefähr im Westen untergeht, auf der Nordhalbkugel ebenso wie am Äquator oder auf der Südhalbkugel, bleibt der Magnetinclinationskompass der Zugvögel weltweit funktionstüchtig. Dies verhindert auch, dass die magnetische Missweisung - die Abweichung des magnetischen Nordpols vom geographischen Nordpol - die Vögel in die Irre führt.

Wo sitzt der Magnetsinn?

Durch Verhaltensversuche im Labor und im Freiland verstehen wir immer besser, welche Rolle der Magnetkompass für die Zugorientierung spielt. Aber wie können Vögel das Erdmagnetfeld überhaupt wahrnehmen? Seit der Entdeckung der Magnetorientierung wird über die physiologischen Grundlagen des Magnetsinns heiß spekuliert.

Das Projekt

Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Animal Navigation unter der Leitung von PD Dr. Henrik Mouritsen (Institut für Biologie und Umweltwissenschaften) sind die Mechanismen der Magnetfeldwahrnehmung bei Zugvögeln - von den physiologischen Prozessen auf Ebene der Rezeptormoleküle bis hin zu den Strategien der Zugorientierung auf Populationsebene. Die Arbeitsgruppe, die von der VW-Stiftung seit 2002 für insgesamt sechs Jahre mit 1,6 Millionen Euro gefördert wird, ist Mitglied des Forschungszentrums Neurosensorik an der Universität Oldenburg.

Über ihre aufsehenerregende Forschungsarbeit hat die Gruppe eine Reihe von wissenschaftlichen Beiträgen veröffentlicht, darunter in Science, PNAS und Current Biology.

Zu den wichtigsten Kooperationspartnern der Arbeitsgruppe gehören: Prof. Dr. Reto Weiler, Universität Oldenburg; Prof. Dr. Erich Jarvis, Duke University, Durham, USA; Prof. Dr. Barrie J. Frost, Queen's University, Kingston, Kanada.

Weltweit suchen Forscher nach dem Sinnesorgan, das, so wie das Auge Lichtquanten oder das Ohr Schallwellen empfängt, das Magnetfeld der Erde detektieren kann. Doch während für uns Sehen, Hören, Riechen oder Schmecken selbstverständlich sind, fehlt uns für das Magnetfeld jedes Gespür - und damit auch die Parallele zur eigenen Sinneswahrnehmung, die uns verraten könnte, wo und wonach wir suchen müssen. In den letzten 30 Jahren entwickelten deshalb Forscher verschiedene Modelle, die theoretisch beschreiben, welche biophysikalischen Eigenschaften potentielle Magnetrezeptoren haben müssen, um bei den geringen Feldstärken des Erdmagnetfeldes (ca. 50 Mikrotesla) überhaupt zu funktionieren.

Mit dem so genannten Radikal-Paar-Mechanismus lassen sich die Eigenschaften des magnetischen Inklinationskompasses, wie wir sie aus Verhaltensversuchen mit Zugvögeln kennen, am besten erklären. Die Idee hierfür lieferte der Biophysiker Klaus Schulten bereits in den 70er Jahren. Aber erst ein viertel Jahrhundert später leitete Thorsten Ritz, zu dieser Zeit Doktorand bei Schulten, daraus konkrete Prognosen über die Natur der Rezeptormoleküle und ihre Lokalisierung ab - und rückte damit den Radikal-Paar-Mechanismus ins Blickfeld der Biologen. Nach diesem Modell besteht der Magnetrezeptor aus einem Molekülpaar, das durch Lichtstrahlen aktiviert werden kann und dann - durch Übertragung eines Elektrons - ein so genanntes Radikal-Paar bildet.

Dieses Radikal-Paar, dessen Lebenszeit nur wenige 1000stel Sekunden beträgt, pendelt ständig zwischen zwei möglichen (quantenmechanischen) Zuständen. Abhängig von dem Zustand, in dem es sich zuletzt befindet, bilden sich Moleküle mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften, wenn das Radikal-Paar schließlich zerfällt. Und genau hier greift die Macht des Erdmagnetfelds: Je nachdem, in welchem Winkel die Magnetfeldlinien auf das Radikal-Paar treffen, verschiebt sich nämlich das Gleichgewicht zu Gunsten des einen oder anderen Zustandes - und beeinflusst darüber das Verhältnis der chemischen Endprodukte zueinander. Auf diese Weise könnte die physikalische Information über die Neigung der Magnetfeldlinien in chemische Signale übersetzt werden, der erste Schritt auf dem Weg zur Sinneswahrnehmung.

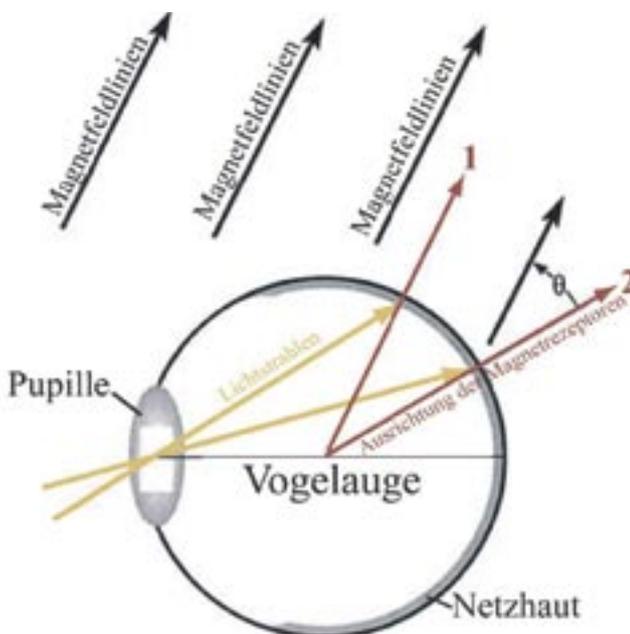
Damit der Magnetkompass funktionieren kann, müssen die Magnetrezeptoren außerdem räumlich so angeordnet sein, dass sie dem Vogel in ihrer Gesamtheit eine eindeutige Information über den Neigungswinkel der Magnetfeldlinien liefern können. Thorsten Ritz und seine Kollegen schlagen deshalb als möglichen Sitz der Sensoren die Netzhaut im Auge der Zugvögel vor: Hier gibt es nicht nur genügend Licht für die Aktivierung der Radikal-Paare, die Netzhaut hat zudem die Form einer Halbkugel, auf der die Rezeptoren in regelmäßigen Abständen fest verankert werden könnten - ähnlich wie die Noppen auf einem Igel-

ball. Auf diese Weise ‚schauen‘ immer nur wenige Rezeptoren genau in Richtung der Magnetfeldlinien, alle anderen weichen mit zunehmendem Abstand auf der Netzhaut immer stärker von ihnen ab. Übersetzt in visuelle Information könnte der Vogel so die Neigung der Feldlinien als graduelles Muster wahrnehmen, das dem normalen Sehen überlagert wird. Basierend auf ihrem Modell haben die Physiker sogar simuliert, wie dieses virtuelle Magnetfeldmuster aussehen könnte, während der Vogel seinen Blick in verschiedene Himmelsrichtungen streifen lässt. Aber wie steht es mit experimentellen Belegen für den Magnetkompass im Auge?

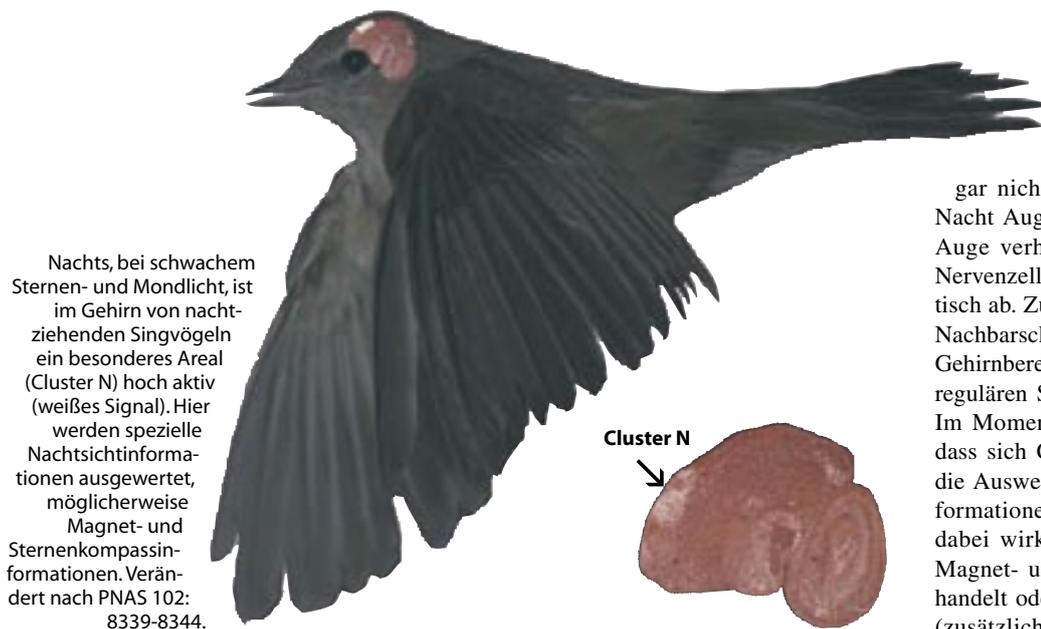
Spurensuche in der Netzhaut

Setzt man im Labor eine Gartengrasmücke während der Zugzeit im Frühling oder Herbst in einen runden Orientierungskäfig, kann man ein interessantes Verhalten beobachten: Kurz, nachdem es abends dunkel geworden ist, beginnt der nachtziehende Singvogel, seinen Kopf immer wieder von links nach rechts zu drehen. Schließlich fängt er an, energisch im Käfig herumzuhüpfen - und zwar in Richtung auf sein angestrebtes Zugziel, sein Winter- oder Sommerquartier. Auch solche Hüpfen werden von regelmäßigen Kopfdrehungen begleitet. Dieses Verhalten spricht dafür, dass die Magnetrezeptoren im Kopf lokalisiert sind. Während der Vogel sich umschaut, scannt er vermutlich das Erdmagnetfeld, um seine magnetische Referenzrichtung zu finden. Schaltet man nämlich das natürliche Erdmagnetfeld im Käfig mit Hilfe von Magnetspulen künstlich aus, hüpfert er nicht nur desorientiert in alle Himmelsrichtungen, er steigert auf der Suche nach der fehlenden Magnetinformation auch die Anzahl der Kopfdrehungen um das Dreifache. Verhaltensversuche der Arbeitsgruppe von Wolfgang und Roswitha Wiltschko an der Universität Frankfurt/M haben außerdem gezeigt, dass die Magnetkompass-Orientierung nur dann funktioniert, wenn Licht in einem bestimmten Wellenlängenbereich vorhanden ist, und wenn der Vogel zumindest auf einem Auge sehen kann (das zweite Auge wird durch eine Augenklappe abgedeckt) - weitere Indizien für Magnetrezeptoren im Auge der Zugvögel.

Um den Rezeptoren selbst auf die Spur zu kommen, haben wir uns zusammen mit den Oldenburger Neurobiologen Reto Weiler und Ulrike Janssen-Bienhold und ihrem Team direkt in der Netzhaut auf die



Magnetrezeptoren im Modell: Licht fällt durch die Pupille auf die Netzhaut und aktiviert die fest (hier: senkrecht zur Oberfläche) verankerten Magnetrezeptoren. Nur wenige Rezeptoren liegen genau in Richtung der Magnetfeldlinien (1), die meisten weichen mehr oder weniger stark davon ab (2). Verändert nach Biophysical Journal 78:707-718.



Nachts, bei schwachem Sternen- und Mondlicht, ist im Gehirn von nachziehenden Singvögeln ein besonderes Areal (Cluster N) hoch aktiv (weißes Signal). Hier werden spezielle Nachtsichtinformationen ausgewertet, möglicherweise Magnet- und Sternkompassinformationen. Verändert nach PNAS 102: 8339-8344.

Suche begeben: Mit speziellen molekularbiologischen Sonden fahndeten wir auf hauchdünnen Netzhautquerschnitten nach so genannten Cryptochromen. Vertreter dieser Molekülgruppe werden aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften als die Spitzenkandidaten unter den potentiellen Magnetrezeptormolekülen gehandelt. Mit einem weiteren Set von Sonden markierten wir zwei Eiweiße namens ZENK und c-Fos, die nur in aktiven Nervenzellen gebildet und deshalb als Marker für neuronale Aktivität benutzt werden. Und wir wurden fündig: In der Netzhaut von Gartengrasmücken kommen Cryptochrome in hohen Konzentrationen in bestimmten Typen von Nervenzellen, den Ganglienzellen, und in Fotorezeptoren vor. Und genau die Ganglienzellen enthalten nachts, wenn die Zugvögel sich im Magnetfeld orientieren, zusätzlich viel ZENK und c-Fos; sie sind also, während der Magnetkompass im Einsatz ist, hochaktiv und senden Information ans Gehirn. Die Ganglienzellen nicht-ziehender Zebrafinken ‚dösen‘ dagegen zur gleichen Zeit, und sie enthalten auch nur wenige oder keine Cryptochrom-Moleküle.

Sind damit die Magnetrezeptoren und ihr Sinnesorgan entlarvt? Der auffällige Unterschied zwischen Zugvögeln und Nicht-Ziehern spricht dafür, dass Cryptochrome die gesuchten Magnetrezeptormoleküle sein könnten und dass die Ganglienzellen die Magnetinformation von der Netzhaut an das Gehirn weiterleiten. Viele wichtige und spannende Fragen sind allerdings noch offen, z.B. wo im Gehirn die magnetische

Information verarbeitet, die magnetische Referenzrichtung bestimmt und das virtuelle Bild vom Magnetfeld erzeugt wird.

Vom Auge ins Gehirn

Zusätzlich zu ihrem Magnetkompass benutzen nachziehende Zugvögel einen Sternkompass zum Navigieren. Auch hier wissen wir nicht, wie und wo im Vogelgehirn die Kompassinformation entschlüsselt wird. Und die beiden nachtaktiven Navigationssysteme haben noch mehr gemeinsam: Sowohl die Sterne als auch das Magnetfeld werden (höchstwahrscheinlich) mit den Augen wahrgenommen, beide Kompassinformationen kommen entsprechend als visueller Input im Gehirn an. Zusammen mit Erich Jarvis und seinen Mitarbeitern von der Duke Universität in North-Carolina hat unsere Gruppe deshalb untersucht, ob Rotkehlchen und Gartengrasmücken, beides nachziehende Singvögel, ein spezielles Gehirnareal für die Verarbeitung visueller Information haben, das nur nachts beim schwachen Licht von Mond und Sternen aktiv ist.

Mit Hilfe der neuronalen Aktivitätsmarker ZENK und c-Fos konnten die beiden Doktorandinnen Gesa Feenders und Miriam Liedvogel einen ca. 2,25 mm³ großen Bereich im Großhirn der Zugvögel identifizieren, in dem die Nervenzellen eifrig feuern, wenn die Vögel nachts bei künstlichem Mondlicht im Orientierungskäfig sitzen. Tagsüber bleibt es in diesem Gehirnareal, das wir ‚Cluster N‘ (N für Nacht-Aktivierung) getauft haben, hingegen ruhig - und bei nicht-ziehenden

Zebrafinken oder Kanarienvögel ist das Areal weder tags noch nachts aktiviert, möglicherweise existiert es gar nicht. Tragen die Zugvögel in der Nacht Augenklappen, die den Input vom Auge verhindern, fällt die Aktivität der Nervenzellen in Cluster N ebenfalls dramatisch ab. Zudem liegt Cluster N in direkter Nachbarschaft zum visuellen Wulst, einem Gehirnbereich, der für die Verarbeitung von regulären Sehinformationen zuständig ist. Im Moment deutet also alles darauf hin, dass sich Cluster N im Zugvogelhirn auf die Auswertung bestimmter Nachtsichtinformationen spezialisiert hat. Ob es sich dabei wirklich um die Verarbeitung von Magnet- und Sternkompassinformationen handelt oder ob Cluster N den Zugvögeln (zusätzlich) hilft, bei schummrigen Sternen- und Mondschein besser zu sehen, wissen wir allerdings noch nicht. Aber wir arbeiten dran!

Die Autoren



Privatdozent Dr. Henrik Mouritsen leitet seit 2002 die Volkswagen Nachwuchsgruppe Animal Navigation an der Universität Oldenburg. Der Wissenschaftler, der aus Dänemark stammt und schon als Kind von den Navigationsleistungen der Zugvögel fasziniert war, studierte Biologie an der Universität Odense und promovierte hier 1998 über die Orientierungsmechanismen der Vögel. Nach einem PostDoc an der Queen's Universität in Kanada kam Mouritsen 2002 an die Universität Oldenburg, wo er sich im Jahr 2005 habilitierte. Das Thema: „Orientation cues and strategies used by long-distance migrants“.

Julia Stalleicken studierte an der Universität Essen Umweltwissenschaften und ist seit 2002 Doktorandin in der Arbeitsgruppe Animal Navigation in Oldenburg. Ihr Interesse gilt der Kompassorientierung wandernder Tag- und Nachtfalter, insbesondere der Monarchfalter.