

■ Dem Magnetsinn beim Rotkehlchen auf der Spur

Die Fähigkeit, das Erdmagnetfeld zur Orientierung bei Fortbewegung auf dem Land, im Wasser oder in der Luft zu nutzen, ist bei vielen Tieren beobachtet und beschrieben worden. Das Zugverhalten von Vögeln ist dafür ein bekanntes Beispiel. Versuche, die zugrundeliegenden Mechanismen aufzuzeigen und zu verstehen, führten zu verschiedenen Modellen (BINDER 2017). Deren grundsätzliche Wirksamkeit kann im Laborexperiment (bei vergleichsweise hohen Magnetfeldstärken) demonstriert werden. Ob sie aber auch unter den natürlichen Bedingungen bei den geringen Feldstärken des Erdmagnetfeldes funktionieren, wird nach wie vor kontrovers diskutiert.

Aus der physikalischen Chemie ist bekannt, dass chemische Reaktionen, bei denen Systeme mit Radikalpaaren auftreten (Moleküle mit zwei einzelnen ungepaarten Elektronen), durch Magnetfelder beeinflussbar sind. Ein auf solchen Radikalpaaren beruhender Mechanismus

ist für den Kompass in der Retina (Netzhaut) von Zugvögeln vorgeschlagen worden. In Proteinen, die man als Cryptochrome bezeichnet, können solche Radikalpaare durch Licht induziert werden; dabei werden Elektronen nacheinander über mehrere Tryptophane aus dem Polypeptid auf ein nicht kovalent gebundenes Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD) – ein wichtiges Koenzym zur Elektronenübertragung – schrittweise übertragen.

Das Europäische Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*) ist als Nachtzieher bei der Erforschung des Magnetsinns ein etabliertes Untersuchungsobjekt. Ein internationales Forschungsteam hat das Cryptochrom 4 aus der Retina von *E. rubecula* biotechnologisch produziert. Durch verschiedene spezielle spektroskopische Methoden haben die Autoren gezeigt, dass im Cryptochrom 4 Elektronen schrittweise über 4 Tryptophane zum FAD übertragen werden können. Zu Vergleichszwecken wurde in vier modifizierten Proteinen jeweils eines dieser Tryptophane durch die Aminosäure Phenylalanin ersetzt (durch

entsprechende ortsspezifische Mutationen). Die Lebensdauer der Radikale im Wildtyp-Protein ist im Vergleich zu den mutierten Formen am längsten und damit auch die Möglichkeit am größten, als magnetischer Sensor zu wirken. Im Labor zeigt ein Vergleich mit dem entsprechenden Cryptochrom 4 von Felsentaube (*Columba livia*) und Bankivahuhn (*Gallus gallus*; Wildform des Haushuhns), die beide nicht ziehende Vögel sind, dass das Protein aus *E. rubecula* deutlich höhere magnetische Empfindlichkeit aufweist.

In weiteren Experimenten konnte auch gezeigt werden, dass das potenzielle Sensorprotein in Gegenwart von Luft und Sonnenlicht (durch Oxidation des FAD) wieder in den Ausgangszustand versetzt wird, damit regeneriert und wieder als Sensor verfügbar ist. Damit das Cryptochrom als Magnetsensor im lebenden Organismus (in vivo) bei den vorherrschenden geringen Stärken des Erdmagnetfeldes (ca. 50 μT = Mikrottesla) wirken kann, d. h. sowohl die Funktion des Sensors als auch des entsprechenden Signalgebers erfüllen kann, muss die Lebensdauer des Radikalpaares um eine Größenordnung größer sein, als in den Experimenten mit gelöstem Protein gezeigt werden konnte (größer als 1 μs im Vergleich zu 100 ns). Xu et al. (2021) spekulieren darüber, dass dies durch entsprechende Fixierungen des Proteins in der natürlichen Umgebung und Kooperation mit anderen Proteinen möglich sein könnte. Es bleibt also noch eine ganze Reihe von Fragen offen.

Xu et al. (2021) haben mit ihrer Arbeit erstmals experimentell gezeigt, dass das Cryptochrom 4 aus der Retina von *E. rubecula* der Grundbaustein des Magnetsinns beim Rotkehlchen sein könnte. In diesem Protein können durch Licht angeregte Radikalpaare gebildet werden, die sich als magnetisch sensitiv erweisen. Schon jetzt aber wird erkennbar, dass in den Organismen, in denen dieser Mechanismus für den Magnetsinn möglicherweise realisiert ist, die molekularen Anordnungen hoch spezifisch und in einer noch unbekannten Weise optimiert sein müssen.



Abb. 1 Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). (Nicky RHODES, Adobe Stock)

■ Primitivität kein Wegweiser für Evolution

Wenn es eine allgemeine Evolution der Lebewesen gegeben hat, müssen alle Formen des Lebens letztlich auf morphologisch und genetisch einfachere Vorgängerstadien zurückgeführt werden können. Rückbildungen sind damit nicht ausgeschlossen, aber auch das, was rückgebildet wurde, musste zuvor aufgebaut worden sein. Es ist also klar, dass im Rahmen des Evolutionsparadigmas nach einfacheren Vorläufern gesucht werden muss. Auch Wirbeltiere müssten über einfachere Vorstufen entstanden sein. Der Fossilbericht gibt hierzu allerdings kaum Auskunft. Wie in vielen anderen Fällen müssen sich Befürworter der Evolutionstheorie mit Modellen begnügen, wie solche Vorläufer ausgesehen haben könnten. Hier schienen die wurmförmigen Larven (Ammocoetes) der Neunaugen geeignet zu sein, denn sie sind besonders einfach gebaut und wurden häufig als Relikte aus den Anfängen der Wirbeltier-Evolution interpretiert. Die Ammocoetes-Larven sind augenlos, vergraben sich nach dem Schlüpfen im Flussbett und filtern mit borsenartigen Strukturen Nahrungspartikel aus dem Wasser. Sie ähneln oberflächlich dem heute lebenden 4-7 cm langen Lanzettfischchen (*Branchiostoma*). Ausgewachsene Neunaugen verdanken ihren Namen sieben Kiemenspalten und einer Nasenöffnung, die beiderseits den Augen an der Körperseite folgen und bei flüchtigem Anblick wie Augen aussehen. Neunaugen besitzen einen aalartigen Körper; ihr kieferloses rundliches Maul ist mit kleinen Zähnen besetzt. Damit heften sie sich an Fische und saugen ihr Blut.

Fossilfunde von Neunaugenlarven. Nun hat eine Forschergruppe die bisher ältesten Larven- und Jugendformen von vier Neun-

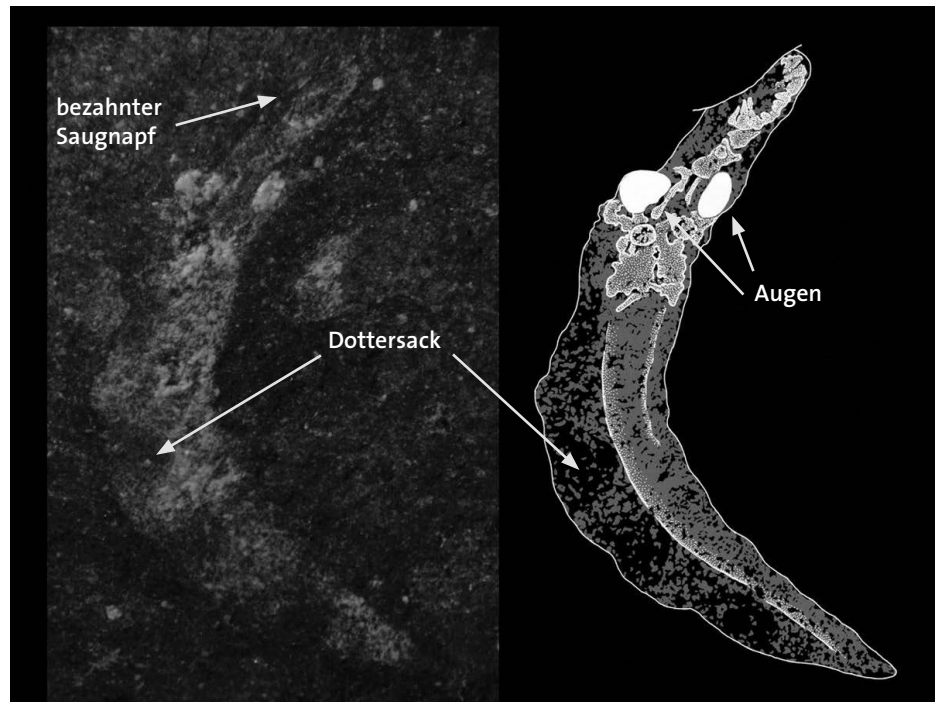


Abb. 1 Fossil einer frisch geschlüpften Neunaugenlarve aus dem Oberdevon. Das Tier ist nur wenige Millimeter groß. (Bild: Tetsuto MIYASHITA)

augen in den USA und in Südafrika entdeckt (MIYASHITA et al. 2021). Die Fundschichten werden dem Karbon und oberen Oberdevon (Famennium) zugeordnet, deren Alter mit 310 bzw. 360 Millionen radiometrischen Jahren (MrJ) angegeben wird. Sie sind damit ca. 200 MrJ älter als die bisher bekannten ältesten Neunaugenfossilien. Bei der Gattung *Priscomyzon* wurden sogar Exemplare vom Stadium des Schlüpfens (Abb. 1) bis zum Erwachsenenstadium nachgewiesen. Überraschenderweise fehlen den Larven aller vier Gattungen die definierenden Merkmale der Ammocoeten. Stattdessen weisen sie Merkmale auf, die sonst nur bei den erwachsenen heute lebenden Neunaugen zu finden sind, wie z. B. hervorstehende Augen, den typischen gezähnten Saugnapf und vereinigte Kiemenkörbe. Die Analyse der Merkmalsverteilungen ergab, dass die fossilen Larven mindestens drei unabhängigen Stammlinien der Neunaugen zugeordnet werden müssen. Damit liegt es nahe, dass diese komplexer gebauten Larven evolutionär als ursprünglich zu werten sind und somit die heutigen einfacher gebauten Ammocoeten-Larven Rückbildungen sind. Die Forscher deuten diese Rückbildungen als Anpassungen an das Leben in Flüssen. Die

einfach gebauten Ammocoeten-Larven eignen sich somit nicht als Wirbeltier-Vorläufer bzw. sie erlauben keine Einblicke in deren frühe evolutionäre Geschichte. Ihre Einfachheit wurde als Urtümlichkeit fehlinterpretiert – so die Autoren. Diese Deutung war schon zuvor nicht unangefochten. Fossilien der Gattungen *Metaspriggina* und *Mylokunmingia* werden alternativ als mögliche Wirbeltiervorläufer diskutiert.

Das Beispiel zeigt einmal mehr, dass die Orientierung an Einfachheit oder Komplexität keine sichere Beurteilung evolutiver Vorgänge ermöglicht. Einfachheit kann in evolutionärer Deutung auch als Folge einer Rückbildung interpretiert werden. Die Entstehung von Wirbeltieren bleibt aus evolutionstheoretischer Sicht mehr denn je im Dunkeln. Bemerkenswert ist, dass während die Larven verschiedener Neunaugen große Unterschiede aufweisen, die ausgewachsenen Tiere ausgesprochen konstant in ihrer Ausprägung sind. Die neuen Fossilfunde reißen zudem eine große Überlieferungslücke von ca. 200 MrJ auf.

[MIYASHITA T, GESS RW, TIETJEN K & COATES MJ (2021) Non-ammocoete larvae of Palaeozoic stem lampreys. Nature 591, 408–412.] R. Junker