

S T R E I F L I C H T E R

Stichlinge: Vorprogrammierte Variabilität?

Der dreistachelige Stichling (*Gasterosteus aculeatus*) wird schon seit einigen Jahren genetisch untersucht. Er kommt in Küstengewässern und im Süßwasser der Nordhemisphäre vor. Besonderes Interesse wecken die drei namengebenden Rückentacheln, die mit dem Beckengürtel verbunden sind. Einige weit voneinander entfernt lebende Süßwasserpopulationen dieser Art besitzen diese Stacheln jedoch nicht, auch der Beckengürtel fehlt ihnen ganz oder teilweise. Man geht davon aus, dass dieser Verlust wahrscheinlich über 20 mal unabhängig erfolgt ist. Ein Forscherteam um David KINGSLEY hat herausgefunden, dass der Verlust dieser Körperteile auf eine Deletion (Verlust) einer Regulationssequenz zurückgeht, die etwa 30 kb (Kilobasen) vor dem *Pitx1*-Homeobox-Gen liegt (CHAN et al. 2010). Homeobox-Gene sind regulative Gene, durch deren Produkte die Aktivität anderer, funktionell zusammenhängender Gene während der Individualentwicklung gesteuert wird. Bei der verlorengegangenen Sequenz handelt es sich um einen sogenannten Enhancer, das ist ein DNA-Abschnitt, der die Transkription (das Ablesen) eines nachgeschalteten Gens steuert bzw. verbessert. Die Forscher bauten DNA mit dem betreffenden intakten Enhancer in befruchtete Eier von Fischen ein, denen die Stacheln und der Beckengürtel fehlten. Die daraus sich entwickelnden Tiere bildeten einen Beckengürtel aus, womit gezeigt wurde, dass der Verlust der Regulationssequenz ursächlich für den Verlust des Beckengürtels war.

Dieses Beispiel zeigt einmal mehr, dass eine markante Gestaltänderung durch eine ziemlich einfache Änderung der DNA möglich ist. Da es sich in diesem Fall um einen Verlust handelt, trägt dieses Beispiel nichts zum Verständnis bei, wie neue Bauelemente der Lebewesen erstmals entstehen. Der Verlust ist im Süßwasser verkraftbar, da die Stichlinge weniger durch Raubfische bedroht sind, so dass der Schutz durch die Stacheln nicht erforderlich ist und diese eingespart werden können. Die Autoren diskutieren Hinweise auf positive Selektion der Stachellosigkeit der Süßwasserfische. Sie vermuten, dass die Enhancer-Region des *Pitx1*-Gene für Änderungen prädisponiert ist, so dass es zu vielfach unabhängigen Verlusten kommen konnte. Das könnte auch als Vorprogrammierung interpretiert werden. Schon in früheren Studien war festgestellt worden, dass auch seitliche Panzerplatten und Bauchstacheln bei Stichlingen durch das Vorhandensein oder die Abwesenheit bestimmter Allele (Gen-Varianten) ausgebildet werden (CRESKO et al. 2004; COLOSIMO et al. 2005, vgl. WINKLER 2005a, b).

[CHAN YF, MARKS ME et al. (2010) Adaptive evolution of pelvic reduction in sticklebacks by recurrent deletion of a *Pitx1* enhancer. *Science* 327, 302-305; CRESKO WA, AMORES A et al. (2004) Parallel genetic basis for repeated evolution of armor loss in Alaskan threespine stickleback populations. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101, 6050-6055; COLOSIMO PF, HOSE-MANN KE et al. (2005) Widespread parallel evolution in sticklebacks by repeated fixation of *Ectodysplasin* alleles. *Science* 307, 1928-1933; WINKLER N (2005a) Über genetische Schalter bei Stichlingen. *Stud. Int. J.* 12, 32-34; WINKLER N (2005b) Stichlinge: Evolution oder Allelfrequenzverschiebung. *Stud. Int. J.* 12, 76-77] R. Junker

Chemische Überreste von *Archaeopteryx* nachgewiesen

Archaeopteryx ist als sogenannter „Urvogel“ berühmt. Mit diesem Gattungsnamen bezeichnet man eine Gruppe fossiler Archosaurier („Herrscherreptilien“), die im Altmühltal in den Solnhofener Plattenkalken gefunden wurden. Die bisher beschriebenen Exemplare weisen Merkmale von Reptilien auf (z. B. einen bezahnten Kiefer und Schwanzwirbel) und solche, die für Vögel als typisch gelten (mit Federn bedeckte Flügel). Oft wird *Archaeopteryx* als Übergangsform zwischen Sauriern und Vögeln interpretiert. Für die bisherigen Studien der Struktur dieser Fossilien wurden diese neben optischen Methoden auch mit Hilfe von Röntgentomographie, Elektronenmikroskopie und mikroskopischen Methoden unter Zuhilfenahme von UV- und sichtbarem Licht untersucht.

BERGMANN et al. (2010) beschreiben erstmals den Einsatz von Synchrotron-Röntgenstrahlung, die in der Probe eine für die chemischen Elemente spezifische Fluoreszenz auslöst (synchrotron rapid scanning X-ray fluorescence, SRS-XRF). Die Fluoreszenzsignale kann man dann in bildgebenden Verfahren nutzen und so elementspezifische Bilder erzeugen. Mit dieser Methode untersuchten sie das so genannte „Thermopolis-Exemplar“, das der Art *Archaeopteryx siemensii* zugeordnet wird. Dieses Fossil wurde von MAYR et al. (2005, 2007) wissenschaftlich beschrieben.

Mit der angewendeten Methode kann sowohl das Fossil selbst als auch das umgebende Gestein (Matrix) auf die chemischen Bestandteile hin untersucht werden. Die Autoren konnten Hinweise zur Physiologie des lebenden *Archaeopteryx*, zum Pro-

Abb. 1: Dreistacheliger Stichling *Gasterosteus aculeatus*. (Foto: W. CRESKO, University of Oregon, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)



zess der Fossilisierung und Einflüsse der Pflege des Fossils im Museum finden.

Die Bilder auf der Basis der für Phosphor (P) spezifischen Signale zeichnen das sichtbare fossil überlieferte und präparierte Skelett sehr detailreich nach. Erstaunlicherweise zeigt diese Darstellung auch sonst nicht erkennbare Schäfte (Rachis) von Schwungfedern. Der Gehalt an P und S (Schwefel) kann aus dem ursprünglichen Gehalt der Elemente in Skelett und Federn erklärt werden, man muss keine Anreicherung aus der Umgebung annehmen. Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass die Federäste im Vergleich zum Federkiel schneller durch Bakterien abgebaut werden. Aus diesen Befunden schließen die Autoren, dass die fossilen Rückstände der Federschäfte zumindest teilweise chemische Bestandteile des ursprünglichen Lebewesens enthalten. Auch Zink (Zn) erscheint im Skelett deutlich angereichert, während dessen Konzentration im umgebenden Kalkgestein gering ist; daher geben die Zn-Bilder die Knochen gut wieder. Die Autoren fanden keine Hinweise darauf, dass Zn durch wässrige Lösungen angeliefert worden wäre. Vermutlich stammt also auch das vorhandene Zn aus den Knochen des *Archaeopteryx*.

Die Vorkommen von Eisen (Fe) und Mangan (Mn) ergeben ein anderes Bild, hier scheinen deutliche Veränderungen abgelaufen zu sein (z. B. Mn-Ausfällungen, Dendriten). Für alle gemessenen chemischen Elemente liegt die Verteilung aus dem Bereich der Federn innerhalb der statistischen Verteilung in der übrigen Kalkplatte, so dass nur Spuren des Materials von „Weichteilen“ erhalten geblieben sind. In allen weiteren anatomischen Strukturen weichen die jeweiligen Elementkonzentrationen von denjenigen in der Matrix signifikant ab. Zn und Cu (Kupfer) sind auffällig angereichert in Schädel, Krallen, postcranialem Skelett und den Zähnen; P und S konzentrieren sich in den Zähnen von *Archaeopteryx*. Die Analysenergebnisse wurden mit unabhängigen Methoden (inductive coupled plasma, ICP; Punktanalysen) bestätigt.

Damit haben die Autoren gezeigt, dass Elementanalysen an Fossilien sich zu Studien über chemische Änderungen vor und nach der Fossilisation eignen; weiter wird aufgedeckt, dass die Konzentration von Elementen innerhalb einer bestimmten Struktur stark variieren können.

BERGMANN et al. können mit ihrer Methode auch anatomische Strukturen im Submillimeterbereich differenziert analysieren. Das demonstrieren sie durch die Untersuchung einer Handkrallen: hier ist erstaunlicherweise die Elementverteilung zwischen dem Knochen der Handkrallen und deren Keratummantelung in den elementspezifischen Abbildungen nicht zu unterscheiden. Die Darstellung von Federresten anhand von P-Signalen zeigt ebenfalls Strukturen im Submillimeterbereich.

Im Blick auf die Entstehung des Fossils (Taphonomie) zeigt die Untersuchung der einzelnen Ele-

mente, dass ca. 90% des ursprünglich vorhandenen P verschwunden sind, aber auch die Matrix, das umgebende Kalkgestein ist auffällig arm an P, so dass der noch im Skelett verbliebene P aussagekräftige Abbildungen ermöglicht. Der Verlust an Ca ist dagegen extrem gering (ca. 4%), was auf die Kalkmatrix zurückgeführt werden kann. Der hohe Zn-Gehalt könnte evtl. mit dem geringen Ca-Verlust gekoppelt sein.

S und Fe liegen in oxidiert Form (z. B. S als Sulfat) vor und weisen damit darauf hin, dass nach den für die Phase der Sedimentation angenommenen reduzierenden Bedingungen zumindest zeitweise oxidierende Bedingungen vorherrschen haben müssen.

Die Abbildung aufgrund der Chlor (Cl)-Signale macht Fingerabdrücke auf der Platte erkennbar, was die Autoren zu Vorsichtsmahnungen für die Handhabung von Fossilien in Museen veranlasst.

Die von BERGMANN et al. (2010) angewandte Methode zur Untersuchung von Fossilien ermöglicht sehr vielfältige und differenzierte Aussagen über das Fossil. Dabei gewinnt man sowohl Hinweise auf physiologische Aspekte des Lebewesens als auch Aussagen zu seiner Fossilisierung und der Geschichte seiner geologischen Geschichte, bis hin zu seiner Präparation und Pflege im Museum. Man darf darauf gespannt sein, wie diese Methode zukünftig mit dazu beitragen wird, die Hinweise aus der Erdgeschichte genauer betrachten zu können und etwas besser zu verstehen.

[BERGMANN U, MORTON RW, MANNING PL, SELLERS WI, FARRAR S, HUNTLEY KG, WOELIUS RA, & LARSON P (2010) *Archaeopteryx* feathers and bone chemistry fully revealed via synchrotron imaging. Proc. Nat. Acad. Sci. USA; doi/10.1073/pnas.1001569107; MAYR G, POHL B, & PETERS DS (2005) A well-preserved *Archaeopteryx* specimen with Theropod features. Science 310, 1483-1486; MAYR G, POHL B, HARTMANN S, & PETERS DS (2007) The tenth specimen of *Archaeopteryx*. Zool. J. Linn. Soc. 149, 97-116] H. Binder

Konnte *Archaeopteryx* doch nicht aktiv fliegen?

Die Flugfähigkeit des berühmten „Urvogels“ *Archaeopteryx* wurde immer wieder kontrovers diskutiert. Seine modern anmutenden Federn schienen aber deutlich dafür zu sprechen, dass die Flügel gewissen aerodynamische Belastungen – als Voraussetzung für die Fähigkeit zum aktiven Flug – standhalten können. Eine Analyse der Federschäfte der Handschwingen von *Archaeopteryx* (NUDDS & DYKE 2010) brachte nun ein etwas anderes Ergebnis: Verglichen mit heute lebenden Vogelarten waren die Schäfte deutlich zu schwach für einen kontinuierlichen Ruderflug. Auch unter der Annahme, dass die Schäfte nicht wie bei heutigen Vögeln hohl waren, sondern massiv (was an den Fossilien nicht erkennbar ist), würde ihre Dicke nicht ausreichen, um den Belastungen beim Flug (Widerstand beim Verbiegen) standhalten zu können oder den Vogel aufgrund seiner geschätzten Körper-