

Stichlingsmännchen
zeigen sich zur Laichzeit
prächtigt gefärbt,
mit roter Kehle und
Brust sowie leuchtend
blauer Iris.



EIN FISCH – MIT ALLEN WASSERN GEWASCHEN

TEXT: ELKE MAIER

Dreistachlige Stichlinge leben sowohl im Salz- als auch im Süßwasser. Als am Ende der letzten Eiszeit die Gletscher schmolzen, entstanden neue Seen, und Stichlinge aus dem Meer fanden darin neue Lebensräume. Felicity Jones und ihr Team am Tübinger Friedrich-Miescher-Laboratorium der Max-Planck-Gesellschaft untersuchen, wie das Genom der Fische sich im Zuge der Anpassung verändert. 12 000 Jahre alte Stichlingsknochen liefern Einblicke in die Frühphase dieses Wandels.

Die Geschichte beginnt mit einem Zufallsfund: Im Frühjahr 2018 machte sich ein Geologenteam des Geological Survey of Norway (NGU) auf die Reise in Norwegens äußersten Norden. Ziel der Expedition war es, Bohrkern aus dem Sediment küstennaher Seen zu entnehmen, um so ein Bild von den Meeresspiegelschwankungen gegen Ende der letzten Eiszeit zu bekommen. Als der Geologe Anders Romundset seine Sedimentproben im Labor durch ein feines Sieb filtrierte, fand er darin nicht nur Algen und andere Pflanzenreste: In den Maschen hatten sich auch nur wenige Millimeter große, knöcherne Überreste von Fischen verfangen.

Die Knöchelchen und die winzigen Stacheln waren so gut erhalten, dass der Wissenschaftler gleich wusste, mit wem er es zu tun hatte: mit dem Dreistachligen Stichling (*Gasterosteus aculeatus*). Die vier bis sechs Zentimeter großen Fische kommen bis heute im Meer und in den Seen Skandinaviens vor. Mithilfe der Radiokarbonmethode ließ sich ein Alter von rund 12 000 Jahren für die Knochen ermitteln. Sie stammen also aus einer Zeit, in der weite Teile Nordeuropas noch von mächtigen Eispanzern bedeckt waren.

Als gegen Ende der Eiszeit die Gletscher schmolzen und eine gewaltige Eislast wegfiel, begann sich die Landmasse nach und nach über den Meeresspiegel zu heben. Buchten wurden dabei vom Meer getrennt und füllten sich mit Süßwasser, sodass neue Seen entstanden. In einem von ihnen hat einstmalig der Stichling gelebt, von dem die Knochen und Stacheln stammen. Eingebettet in das Sediment am Seegrund haben die knöchernen Relikte

die Jahrtausende überdauert. Die Geologen übergaben ihren Fund an Andrew Foote, Evolutionsökologe an der Norwegian University of Science and Technology in Trondheim. Foote, ein Experte für alte DNA, nutzte die Chance. In einem Speziallabor an der Universität Kopenhagen machten er und sein Kollege Tom Gilbert sich daran, in den Knochen nach Resten der Erbsubstanz zu suchen. Eine der Schwierigkeiten war, dass die Proben längst nicht nur Stichlings-DNA enthielten, sondern auch DNA-Stücke anderer Organismen – Pflanzen und Bakterien etwa, die damals in derselben Umgebung lebten. In diesem Sammelsurium machten die gesuchten Fragmente letztlich nur ein Prozent aus. Und dennoch gelang es Andrew Foote mit großem Aufwand, die Stichlings-DNA herauszufischen und zu sequenzieren.

Für Felicity Jones, Forschungsgruppenleiterin am Tübinger Friedrich-Miescher-Laboratorium war der Erfolg ihres norwegischen Kollaborations-



partners Foote ein Glücksfall. Gemeinsam mit ihrem Team untersucht die Australierin die Grundlagen von Evolution. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen herausfinden, welche molekularen Mechanismen dafür sorgen, dass sich Organismen an neue Lebensräume anpassen oder sogar neue Arten bilden können. Als Modellorganismen sind die Stichlinge dafür ideal: Im Laufe der letzten 10 000 bis 20 000 Generationen sind Meeresstichlinge in viele verschiedene Süßgewässer wie Seen, Flüsse und Sümpfe eingewandert und haben sich an die neuen Bedingungen angepasst. So sind diese kleinen Fische heute in den gemäßigten Klimazonen der nördlichen Hemisphäre weit verbreitet.

„Das Spannende für uns ist, dass Stichlinge vom Meer aus, vielfach unabhängig voneinander, neue Süßwasserlebensräume besiedelt haben“, sagt Felicity Jones, die vor ihrer Tübinger Zeit schon in Schottland, Neuseeland und den USA geforscht hat. „So können wir dieselben Fragen in mehreren parallelen Systemen untersuchen und damit ausschließen, dass es sich bei den genetischen Anpassungen, die wir entdecken, lediglich um Einzelfälle handelt.“ Im Zuge der Anpassung an die neue Umgebung kam es an verschiedenen Standorten immer wieder zu ganz ähnlichen Veränderungen in der Gestalt, im Verhalten oder in der Physiologie der Fische – ein Prozess, der als parallele Evolution bekannt ist. Wie in einem riesigen Freilandlabor können die Forschenden daher an den Stichlingen die grundlegenden molekularen Mechanismen herausarbeiten, die dafür sorgen, dass sich Organismen an neue Lebensräume anpassen können.

In seinem Hauptwerk, *On the Origin of Species*, lieferte Charles Darwin vor mehr als 160 Jahren erstmals eine plausible Erklärung dafür, wie die Vielfalt des Lebens entstanden ist. Demnach stammen alle heutigen Arten von gemeinsamen Vorfahren ab, deren Nachkommen sich im Laufe von Jahrmillionen auf die verschiedenen Lebensräume verteilt und in un-

terschiedliche Abstammungslinien aufgespalten haben. Triebfeder dieser Entwicklung ist die natürliche Auslese: Von allen Nachfahren eines Lebewesens haben diejenigen, die am besten an ihre Umwelt angepasst sind, den größten Fortpflanzungserfolg. Sie geben daher ihre erblichen Merkmale bevorzugt an die nachfolgende Generation weiter.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Stichlinge leben im Salz- und im Süßwasser. Vom Meer aus haben sie vielfach neue Süßwasserlebensräume besiedelt.

Die kleinen Fische sind ideale Modellorganismen, um zu erforschen, wie sich Lebewesen an veränderte Umwelten anpassen und sogar neue Arten bilden können.

Max-Planck-Forschende haben DNA aus 12 000 Jahre alten Stichlingsknochen analysiert, die in eiszeitlichem Seesediment in Norwegen gefunden wurden. Die Daten geben Einblick in die Evolutionsgeschichte skandinavischer Stichlinge.

Berühmtes Exempel für Darwins Theorie sind die Finken des Galapagosarchipels. Von einer Stammart ausgehend, haben die Vögel auf den verschiedenen Inseln ganz unterschiedliche Schnabelformen hervorgebracht, je nachdem, welche Nahrung sie nutzten. Eine solche Aufspaltung bezeichnen Evolutionsbiologen als adaptive Radiation. „Die Stichlinge sind ein weiteres Beispiel, nur viel besser“, sagt Felicity Jones und lacht. Denn anders als die Galapagos-Finken tun sie den Forschenden den Gefallen, das evolutionäre Schauspiel der Aufspaltung gleich auf mehreren Bühnen aufzuführen. So können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Spektakel immer wieder

beobachten und so ihre Erkenntnisse überprüfen.

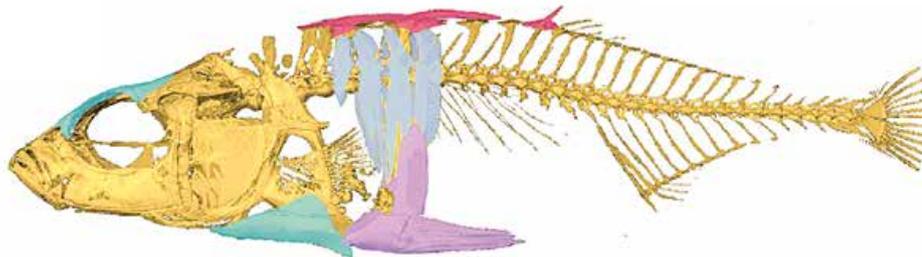
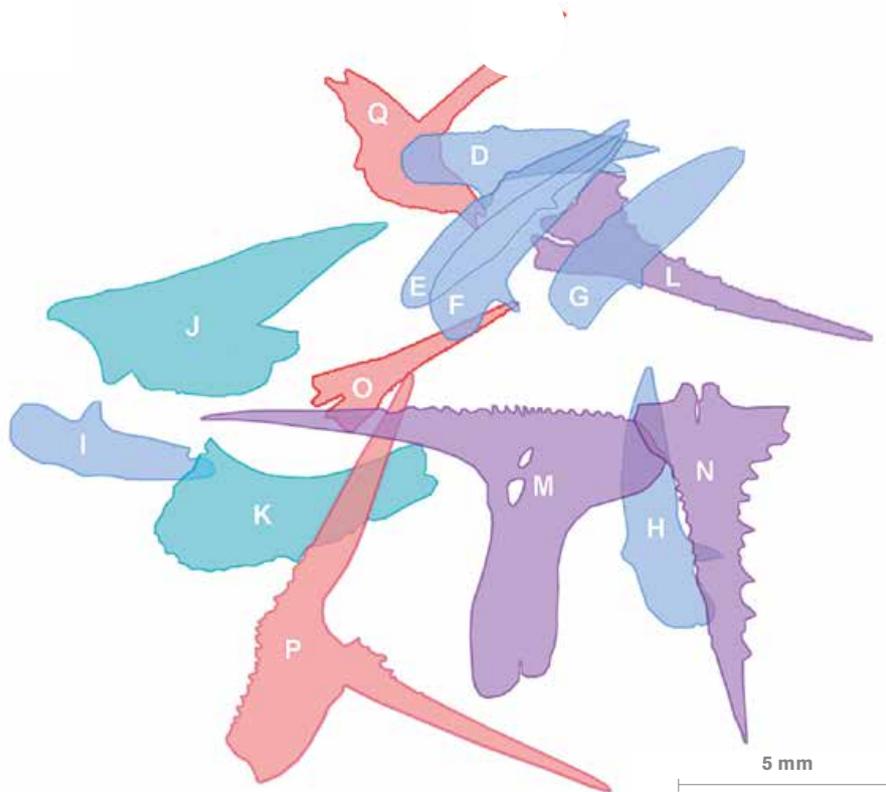
Wie sich die Stichlinge im Zuge der Anpassung verändern, das zeigt sich eindrucksvoll in der Ausbildung der Knochenplatten an den Körperseiten, die dem Schutz vor Fressfeinden dienen. Individuen aus dem offenen Meer, die sich vor Räubern kaum verstecken können, setzen zu ihrer Verteidigung auf eine umfangreiche Panzerung. Ihre Artgenossen im See, die Unterschlupf im Pflanzendickicht finden, können sich diesen Materialaufwand sparen. Sie rüsten ab und tragen schließlich nur noch wenige Platten vorne am Rumpf.

Seit Darwins Zeiten hat die Evolutionsbiologie gewaltige Fortschritte gemacht. Dank moderner Analyseverfahren können Forschende heute im Genom nach den charakteristischen Spuren fahnden, die die Evolution dort hinterlassen hat. „Die meisten unserer Erkenntnisse darüber, wie das Genom funktioniert, stammen aus dem Labor, von eigens gezüchteten Modellorganismen. Dagegen wissen wir noch immer recht wenig darüber, wie natürlich vorkommende genetische Unterschiede die Evolution von Freilandpopulationen beeinflussen“, sagt Felicity Jones.

Ein Fenster in die Vergangenheit

Der prähistorische Knochenfund eröffnete dem Tübinger Team und seinen Forschungspartnern ganz neue Möglichkeiten: Erstmals hatten sie einen Urahnen der Süßwasserstichlinge vor sich, und dieser Fisch, der vor rund 12 000 Jahren gelebt hat, gab auch noch genetische Informationen preis. „Nach unserem Kenntnisstand sind das die ältesten Fischknochen, von denen jemals Genomdaten gewonnen wurden“, sagt Felicity Jones. „Sie öffnen uns ein Fenster in die Vergangenheit, sodass wir nachvollziehen können, welche genetische Variation die Tiere mitbrachten, als sie sich an ihre neuen Lebensräume anpassten.“

GRAFIK: ANDY FOOTE, MELANIE KIRCH, ANDERS ROMUNDSET



71

Relikte der Eiszeit: Um sie zu identifizieren, verglichen die Forschenden die gefundenen Skelettelemente (oben) mit Röntgenaufnahmen eines heutigen Stichlings (unten). So konnten sie die alten Knochen einem einzigen Individuum zuordnen.

Die knöchernen Relikte fanden sich in einer Sedimentschicht, welche den Übergang vom Salz- zum Süßwasser markiert. Als gegen Ende der Eiszeit einzelne Meeresbuchten nach und nach vom Meer getrennt wurden, blieben Stichlinge in den isolierten Gewässern zurück. Es gelang ihnen, sich an die neuen Gegebenheiten des Brackwassers anzupassen und sich fortzupflanzen. In den unterschiedlichen Gewässern entstanden so im Laufe der Zeit zahlreiche neue Typen,

die sich von ihren Verwandten im Meer unterschieden. Rein äußerlich variierten die Fische in ihrer Körpergröße und der Pigmentierung, in der Länge ihrer Rückenstacheln sowie in der Größe und Anzahl der Knochenplatten.

Um sich ein Bild davon zu machen, was sich auf genetischer Ebene verändert hatte, verglichen die Forscherinnen und Forscher die Erbsubstanz des eiszeitlichen Stichlings mit der seiner

Nachfahren. Zu diesem Zweck analysierten sie Stichlinge aus zwei küstennahen Seen südlich der Stadt Hammerfest. Aus einem der Seen stammt auch der Knochenfund, der die prähistorische DNA beisteuerte. Zusätzlich sequenzierten die Forschenden auch die Genome von Meeresstichlingen aus derselben Gegend.

Der Vergleich der Erbsubstanz ergab schließlich, dass der Eiszeitfisch seinen heutigen Artgenossen aus dem





Fisch in Farbe: Die Forschenden haben ein Stichlingsskelett eingefärbt, um einzelne Elemente sichtbar zu machen. Süß- und Salzwasserstichlinge unterscheiden sich etwa in der Stachelnänge oder der Größe und Zahl der Knochenplatten, die sie zum Schutz vor Fressfeinden am Körper tragen.

72

Meer genetisch stark ähnelte: „Die Knochen enthielten vor allem solche Genvarianten, die für ein Leben im Salzwasser von Vorteil sind“, erläutert Melanie Kirch, Doktorandin in Felicity Jones' Arbeitsgruppe, die einen Großteil der Genomdaten ausgewertet hat. Daneben fanden sich aber auch Varianten, die bereits eine Anpassung an das Süßwasser erkennen ließen.

Solche Genvarianten finden sich vereinzelt auch unter den heutigen Meerestichlingen. Die Forschenden gehen davon aus, dass Letztere sich hin und wieder mit Artgenossen aus dem Süßwasser paaren, etwa in den Mündungen von Flüssen. Dadurch gelangen immer wieder Süßwasser-Genvarianten in die Meerespopulation. Für die marinen Stichlinge sind diese Varianten nutzlos oder sogar unvorteilhaft und breiten sich daher nicht aus. Bei der Besiedlung neuer Süßwasserlebensräume erweisen sie sich dagegen als Joker: Kann die Evolution auf solche vorgefertigten Bausteine zugreifen, ist eine Anpassung in kürzester Zeit – im Fall der Stichlinge innerhalb von wenigen Jahrzehnten – möglich. Müssen die passenden Genvari-

anten dagegen erst zufällig per Mutation neu entstehen, können mitunter Millionen von Jahren vergehen.

Der Genomvergleich lieferte noch weitere Details zum Werdegang der Süßwasserstichlinge. Er ergab, dass die Fische aus den beiden Seen genetisch weniger divers waren als ihre Vorfahren aus dem Meer. Das lag zum einen daran, dass die vereinzelt Individuen, die damals die Seen neu besiedelten, lediglich einen kleinen Teil der Genvarianten mitbrachten, die unter den Meerestichlingen vorkamen. Zum anderen verschwanden in den neu gegründeten Populationen manche Varianten über die Zeit zufallsbedingt wieder aus dem Genpool – ein Prozess, der als Gendrift bekannt ist. „Allein durch Zufall sind auf diese Weise sogar solche Varianten abhandengekommen, die für ein Leben im Süßwasser vorteilhaft wären“, erklärt Felicity Jones. Eine solche starke genetische Verarmung – typisch für kleine Gründerpopulationen – bezeichnen Biologen bildhaft als „genetischen Flaschenhals“.

Für die Süßwasserstichlinge war dieser Flaschenhals folgenreich: Genetische

Variation ist das Material, aus dem die Evolution neue Anpassungen hervorbringt. Sind viele unterschiedliche Genvarianten vorhanden, kann sie aus dem Vollen schöpfen. Bei den Fischen aus den beiden Seen war die Variation dagegen stark verringert: „Wir vermuten, dass sie nicht so gut an ihren Lebensraum angepasst sind, wie sie es eigentlich sein könnten“, interpretiert Jones die Ergebnisse.

Felicity Jones und ihr Kollaborationspartner Andrew Foote sind begeistert von den neuen Möglichkeiten, die sich mit der eiszeitlichen DNA ergeben. Sie möchten in Zukunft die Evolutionsgeschichte der skandinavischen Stichlinge genauer erforschen. Eines ihrer Ziele ist es, noch mehr prähistorische Stichlingsknochen aus jüngeren Sedimentschichten genetisch auszuwerten. „Wenn wir nicht nur Knochen von einem einzelnen Fisch hätten, sondern von mehreren Individuen, die im Abstand von Hunderten von Jahren gelebt haben, könnten wir direkt nachverfolgen, wie sich das Genom über die Zeit veränderte, nachdem die Stichlinge in ihrem neuen Lebensraum angekommen waren“, sagt Felicity Jones.

←