



EVOLUTION

Leben im Wandel

Evolutionstheorie

Missverständnisse
um Darwin

Artbildung

Evolution
im Zeitraffer

Meinung

Brauchen wir eine neue
Evolutionstheorie?



Antje Findekle
E-Mail: findekle@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
Charles Darwin hat unser Weltbild entscheidend verändert: Dass die Lebewelt auf unserem Planeten kein fertiges Inventar ist, sondern sich beständig wandelt – mal schnell, mal langsam –, war zu seiner Zeit revolutionär und wird auch heute noch von manchen abgestritten. Doch Darwins Ideen, auch wenn teilweise falsch wiedergegeben oder gar missbraucht, und die Weiterentwicklung der Evolutionstheorie gehören heute zum wissenschaftlichen Standard.

In unserem Kompakt stellen wir Ihnen vor, was Darwin wirklich gesagt hat, ob wir eine neue Evolutionstheorie brauchen – und so manche kuriose Entwicklung im Lauf der Jahrtausende.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünscht

CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLEITER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Lt.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Lt.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findekle
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Lt.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

FOLGEN SIE UNS:



04

EVOLUTIONSTHEORIE

Missverständnisse um Darwin

Was hat Darwin wirklich gesagt?

ISTOCK / DUNCAN1890

20

BAKTERIENEVOLUTION

Wie das Einhorn zu seinem Horn kam

Ein Langzeitexperiment bietet lehrreiche Einblicke in die Entwicklungsgeschichte

FOTOLIA / SCIENCE PHOTO

26

ENTWICKLUNG DER CHORDA

Das Rückgrat ist älter als gedacht

Das Rückgrat könnte schon weit früher als gedacht aufgetaucht sein – in Form eines Muskels

ANKE FISCHER / EMBL HEIDELBERG

33

ARTBILDUNG

Evolution im Zeitraffer

Bei manchen Buntbarschen entstehen in Rekordgeschwindigkeit neue Arten

FOTOLIA / DANIEL NIMMERVOLL

49

EVOLUTION DES MENSCHEN

Warum allein der Mensch ein Kinn hat

Allein der Mensch ist im Besitz dieses eigenartigen Schädelteils

ISTOCK / ANGEL HERRERO DE FRUTOS

51

MENSCH VS. SCHIMPANSE

Wer hat die modernere Hand?

Die menschliche Hand scheint einen ursprünglicheren Zustand zu konservieren

FOTOLIA / KLETR

53

MEINUNG

Brauchen wir eine neue Evolutionstheorie?

Forscher streiten über die Aktualität der Evolutionstheorie

JOHN GOULD, AUS: THE VOYAGE OF THE BEAGLE, 1839

64

MEGAFUNA

10 gigantische Tiere der Erdgeschichte

Immer wieder brachte die Evolution extrem große Tiere hervor

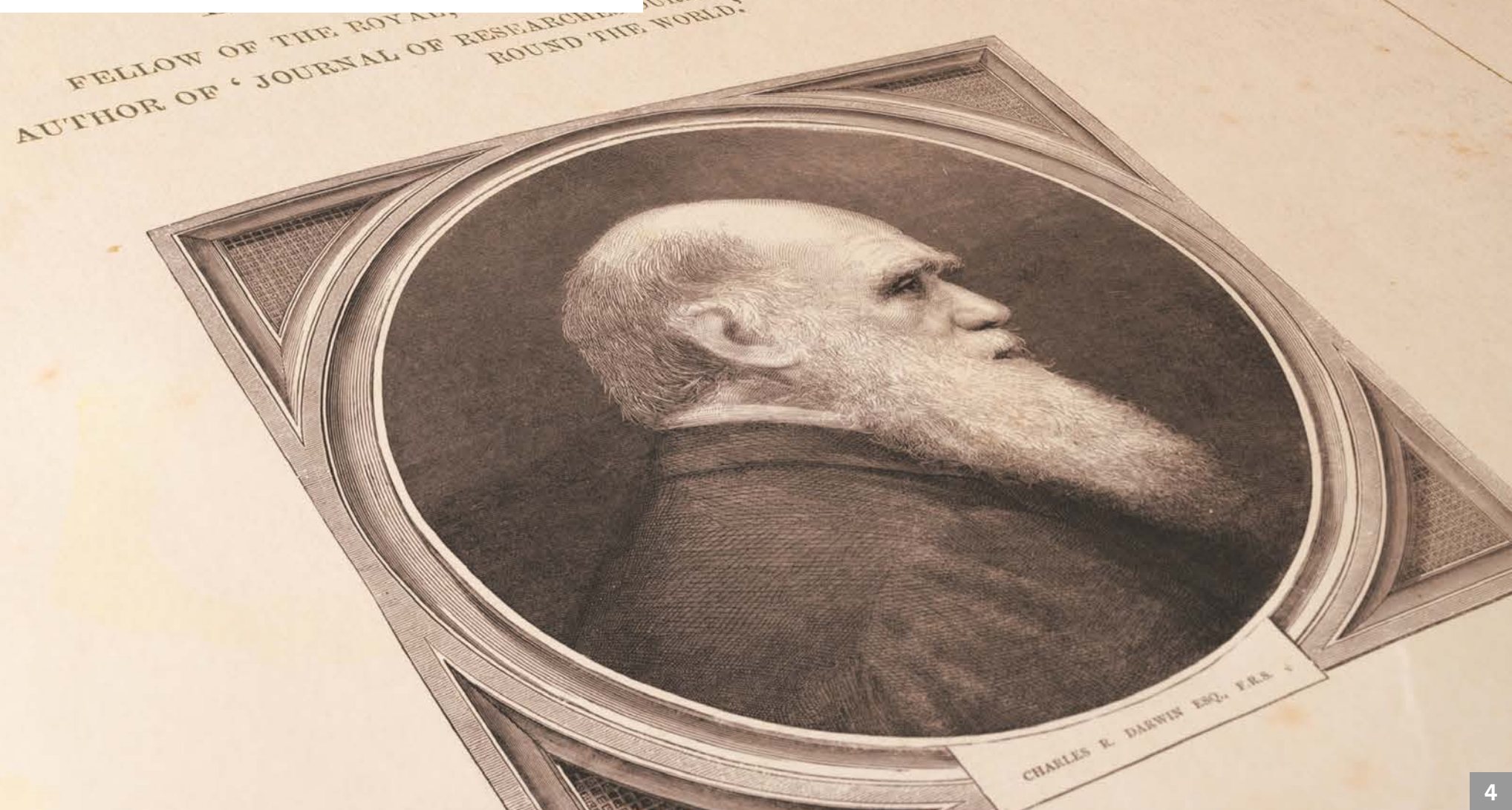
DANTHEMAN9758 / CC-BY-SA-3.0 (CC-BY-SA)

EVOLUTIONSTHEORIE

Missverständnisse um Darwin

von Christoph Marty

Darwins Buch zur Entstehung der Arten, in dem er seine Evolutionstheorie darlegt, gilt als das bedeutendste naturwissenschaftliche Werk der Neuzeit. Einige seiner Thesen sind noch heute umstritten, und manche werden außerhalb der Wissenschaft oft falsch verstanden. Was aber hat Darwin wirklich gesagt?



Um den Meinungskrieg, den Charles Darwins 1859 erschienenen Hauptwerk »On the Origin of Species« auslöste, ranken sich Legenden. Dieser Streit zwischen Evolutionsbefürwortern und -gegnern wurde längst zu Gunsten der Evolutionstheorie entschieden. Trotzdem gibt das berühmte Buch aus verschiedenen Gründen auch Anlass zu Kritik: Der Text liest sich mühsam, schon wegen der umständlichen Sprache; einzelne Ausführungen widersprechen einander; zudem erscheint das Werk lückenhaft – der Autor klammerte einige Fragen aus, die der Buchtitel impliziert; und manche Passagen wirken seltsam unpräzise. Ferner könnte man Darwins Argumentation mangelnde Konsequenz vorwerfen.

Und doch markierte das Erscheinen von »Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl oder die Erhaltung der begünstigten Rassen im Kampf ums Dasein« (im Folgenden kurz die »Origin« genannt) vor 150 Jahren einen Meilenstein in der Geschichte der Naturwissenschaften. Darwin bediente sich zur Erklärung der Lebensvielfalt nicht mehr biblischer Mythen, sondern argumentierte rational. Er ersetz-

te ein längst überkommenes theistisches Weltbild durch ein naturalistisches.

Wohl kaum ein anderes wissenschaftliches Buch dürfte deshalb jemals ein so großes Echo gefunden, zugleich jedoch Zeitgenossen und nachfolgende Generationen so tief gespalten haben. Keines wurde aber auch so oft falsch interpretiert, kein anderer Verfasser immer wieder für verschiedenste vermeintliche Grundübel des jeweils herrschenden Zeitgeists, zum Beispiel für Atheismus, verantwortlich gemacht, kein Theoriengebäude als angeblich »wissenschaftliche Grundlage« für Menschen verachtende Ideologien wie etwa den Nationalsozialismus derart ausgiebig missbraucht. »Meine Ansichten sind häufig grob entstellt, mit Bitterkeit angegriffen und lächerlich gemacht worden«, klagte bereits der alte Darwin (1809-1882) in seiner Autobiografie.

Dabei hatte der Naturforscher seine revolutionären Thesen – nach denen die Arten eine gemeinsame Abstammung haben und sich in einem ebenso blinden wie mechanischen Prozess allmählich verändern – schon selbst in seinem Hauptwerk mit zahlreichen Fakten untermauert. Seit Darwin lieferten Hunderte von Studien weite-

In Kürze

Vor 150 Jahren erschien Charles Darwins grundlegendes Werk »Über die Entstehung der Arten«. Seine Evolutionstheorie besteht aus fünf Einzeltheorien. Viele seiner Grundgedanken haben spätere Forscher weiter ausgebaut. Aber auch neue kamen hinzu. Darwins Beobachtungen und Schlussfolgerungen gelten als die Basis, auf der sich die Biologie begründet.

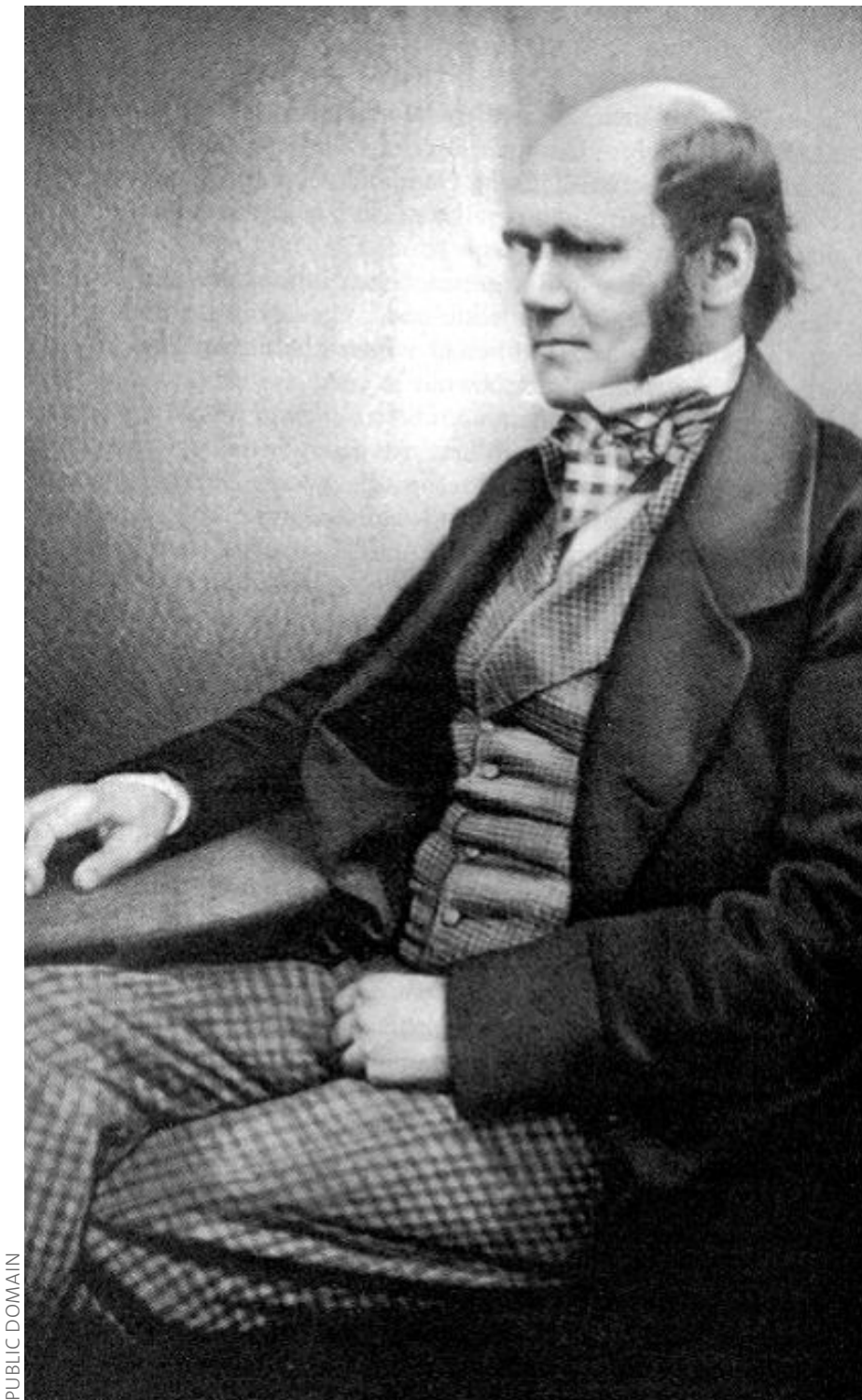
Darwin revolutionierte mit seiner Theorie nicht nur die Wissenschaft, sondern vor allem auch unser Menschenbild. Abgesehen von einigen Außenseiterpositionen wird das von ihm postulierte Geschehen heute allgemein als Tatsache akzeptiert.

re Teile zu dem Riesenpuzzle. So konnten Biologen und Paläontologen etwa anhand von mannigfaltigen Fossilienfunden und anatomischen Vergleichen die evolutionäre Geschichte vieler heutiger Lebewesen und deren verwandtschaftliche Beziehungen überzeugend rekonstruieren. Von anderer Seite belegten später beispielsweise Erbgutvergleiche und vielfältige molekulare Analysen die Stimmigkeit der Deszendenztheorie.

Wissenschaftler akzeptieren die Evolution denn auch längst als Tatsache. Nur eine kleine Fraktion von Ewiggestrigen, Anhänger des Kreationismus oder modern gefasst des »Intelligent Design«, sät mit fragwürdigen Argumenten noch heute Zweifel an der von ihr verhassten evolutionsbiologischen Weltanschauung. Dabei war die wissenschaftliche Glaubwürdigkeit des biblischen Schöpfungsberichts eigentlich schon lange vor Erscheinen der »Origin« kompromittiert: Die damals entdeckten fossilen Faunen wollten einfach nicht zu dem Mythos passen, dass sich die Biota der Erde seit ihrer Schöpfung nicht verändert hatten. Geologische Studien sprachen zudem klar dafür, dass die Erde weitaus älter sein müsse als jene 6000 Jahre, die ihr die

anglikanische Kirche, gestützt auf die Bibel, zugestand. Doch als Darwins Abhandlung erschien, hingen sogar noch manche Naturforscher der biblischen Weltsicht an.

»Bei vielen Lesern stieß das Buch daher zunächst auf wenig Wohlwollen«, kommentiert die Biophilosophin Eve-Marie Engels von der Universität Tübingen. »Viele Missverständnisse sind möglicherweise auch deshalb entstanden, weil es viele Menschen einfach nicht verkraftet haben, dass sich der Mensch aus affenähnlichen Vorfahren entwickelt hat.« Nikolaus Kopernikus (1473-1543) hatte die Menschheit einst aus dem Zentrum des Universums verbannt. Charles Darwin entriss ihr nun auch die Krone der Schöpfung. »Damit brachte Darwin die Biologie auf ein intellektuell höheres Niveau, auf dem sich andere Naturwissenschaften wie die Physik bereits befanden – die nämlich Phänomene der unbelebten Natur nicht durch das Eingreifen Gottes, sondern mit allgemein gültigen Gesetzen erklärten«, urteilt Engels. »Darwins Theorien wirkten aber weitaus provozierender, weil sie unser Verständnis der lebendigen Natur betreffen und damit letzten Endes auch das Selbstverständnis von uns Menschen unmittelbar berühren.«



PUBLIC DOMAIN

CHARLES DARWIN MIT 51 JAHREN

Wie sehr ihn angriff, dass seine Erkenntnisse das Weltbild seiner Zeit umwarfen, sah man ihm damals schon an.

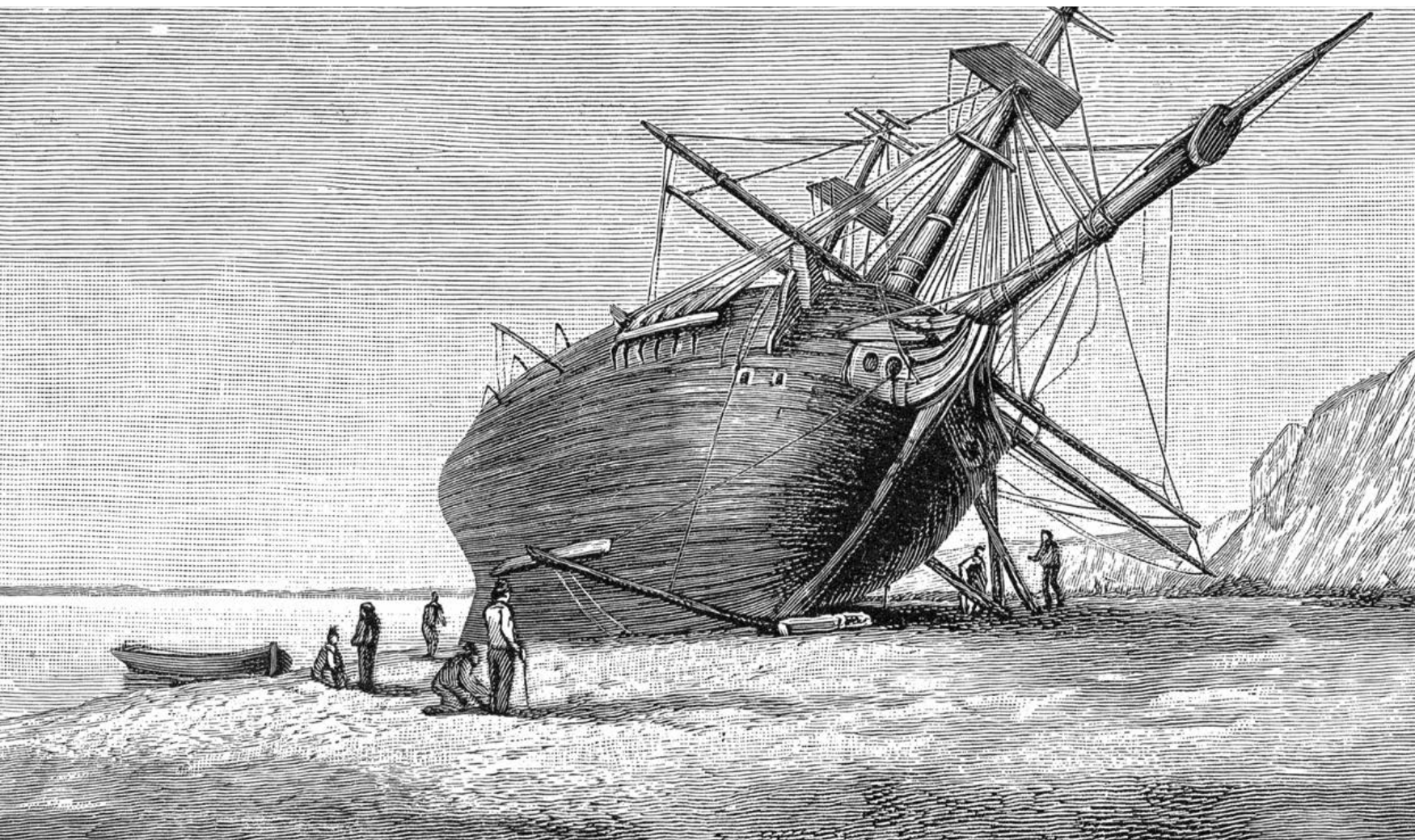
Entsprechend der Bedeutung des Werks waren schon am Erscheinungstag von »Über die Entstehung der Arten«, dem 24. November, alle 1250 Exemplare der Erstauflage vergriffen. »Damals wie heute hat sich das Buch zwar gut verkauft, es ist aber leider kaum im Detail gelesen worden«, erklärt der Evolutionsbiologe Ulrich Kutschera von der Universität Kassel. »Ich wage zu behaupten, dass nur wenige Biologen Darwins ›Origin‹ Seite für Seite studiert haben,

da sich die wesentlichen Inhalte in einigen Sätzen zusammenfassen lassen.«

Heute erschwert zudem die veraltete Sprache die Lektüre. Dazu meint Kevin Padian, Paläontologe an der University of California in Berkeley: »Wenn ich gemeinsam mit meinen Studenten die ›Origin‹ lese, liegt deshalb eine alte Ausgabe der ›Encyclopedia Britannica‹ immer griffbereit. Viele Ausdrücke haben heute eine andere Bedeutung als zu Darwins Zeiten, wie zum

Beispiel das Wort ›Evolution‹, wofür Darwin meist die Bezeichnung ›Transmutation‹ gebraucht hat.«

Im Darwin-Jahr 2009, in das am 12. Februar außerdem Charles Darwins 200. Geburtstag fällt, ist es deshalb noch immer nötig, sich zu versichern, was der Forscher in seinem Artenbuch eigentlich niedergeschrieben hat – und was nicht. Dieser Artikel möchte einige Eindrücke davon vermitteln, welche Impulse Darwin der Biologie verliehen hat – und auch, welche Fragen er offen ließ beziehungsweise offen lassen musste, etwa weil er die von Gregor Mendel (1822-1884) entdeckten Vererbungsgesetze noch nicht kannte. Inspiriert von seinen umfangreichen Beobachtungen auf der fast fünf Jahre dauernden Forschungsreise mit dem Vermessungsschiff »HMS Beagle«, die ihn von 1831 bis 1836 rund um die Welt führte, entwickelte Darwin in den Jahren nach seiner Rückkehr gleich ein gan-



GRAVUR VON THOMAS LANDSEER, 1838, NACH EINER ZEICHNUNG VON CONRAD MARTENS, 1834. IN: THE NARRATIVE OF THE SURVEYING VOYAGES OF HMS ADVENTURE AND BEAGLE. 1838 / PUBLIC DOMAIN

HMS BEAGLE

Das Kriegs- und Vermessungsschiff »HMS Beagle«, auf dem Darwin fast fünf Jahre reiste, hier 1834 zur Überholung auf einem südamerikanischen Strand.



zes Bündel von Hypothesen, die sich in fünf einander ergänzende Einzeltheorien ordnen und zusammen seine Vorstellungen von den Evolutionsprozessen wiedergeben. Diese Ideen seien im Folgenden angerissen.

Die Lebewesen verändern sich in langen Zeiträumen

»Während der Reise der ›Beagle‹ hatte die Entdeckung großer fossiler Tiere, die mit einem Panzer, gleich dem der jetzt existierenden Gürteltiere, bedeckt waren, in der Pampasformation Patagoniens einen tiefen Eindruck auf mich gemacht«, erinnert sich Darwin im Alter in seiner Autobiografie. »Zweitens ebenso die Art und Weise, in der beim Hinabgehen nach Süden über den Kontinent Südamerikas nahe verwandte Tiere einander vertreten, und drittens auch der südamerikanische Charakter der meisten Naturerzeugnisse des Galapagos-

KAKTUSGRUNDFINKEN

Die Vogelwelt der Galapagosinseln lieferte Darwin später wichtige Anhaltspunkte für die Mechanismen der Evolution, hier Kaktusgrundfinken.

archipels, und ganz besonders die Art und Weise, wie sie auf einer jeden Insel der Inselgruppe unbedeutend verschieden sind.«

Der Bedeutung dieser Entdeckungen wurde sich der Naturforscher allerdings erst nach der Rückkehr in seine Heimat bewusst: Verwirrt von den variierenden Schnabelformen der auf den Galapagosinseln heimischen Vögel, hatte er dem britischen Ornithologen John Gould (1804-1881) eine Anzahl Bälge zur Klassifizierung überlassen. Der Vogelexperte identifizierte außer den später berühmt gewordenen »Darwin-Finken« auch drei neue Spott- drossel-Arten und erkannte deren enge Verwandtschaft mit einer auf dem süd- amerikanischen Festland heimischen Spezies. Somit, folgerte Darwin, waren die heutigen verschiedenen Organismen nicht wie im Schöpfungsbericht beschrieben vom Allmächtigen erschaffen und gleich bestens an ihre Umwelt angepasst, sondern sie hatten sich im Verlauf der Erdzeitalter immer mehr verändert und sich erst später an ihre jetzigen ökologischen Nischen adaptiert. »In seinem Buch sucht Darwin nach den Mechanismen dieses Artenwandels«, erklärt Engels. »Die Frage nach der Erstursache lässt er dagegen außen vor.«

Missverständnisse schuf schon der Titel von Darwins Artenbuch – zumindest im englischen Original. Darwins Verleger hatte die verkaufsfördernde Formulierung »On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life« durchgesetzt. Das Wort »Origin« kann allerdings mehreres bedeuten, darunter »Entstehung« ebenso wie »Ursprung«. »Viele Menschen sind deshalb noch heute davon überzeugt, dass Darwin über den Ursprung allen Lebens geschrieben hat«, sagt der Wissenschaftshistoriker John van Wyhe von der University of Cambridge. »Tatsächlich aber war Darwin davon überzeugt, dass die Wissenschaft seiner Zeit diese Frage noch gar nicht beantworten konnte.«

Dies hielt Darwin allerdings nicht davon ab, eifrig über den Anfang allen Lebens zu spekulieren: In Briefen vermutete er, dass das Leben auf chemischem Weg »in einem warmen Tümpel unter Reaktion von Ammonium- und Phosphorsalzen« entstanden sei. In »Über die Entstehung der Arten« liest sich das freilich anders: »Es ist wahrlich etwas Erhabenes um die Auffassung, dass der Schöpfer den Keim allen Lebens, das uns umgibt, nur wenigen oder

gar einer einzigen Form eingehaucht hat und dass, während sich unsere Erde nach den Gesetzen der Schwerkraft im Kreise bewegt, aus einem so schlichten Anfang eine unendliche Zahl der schönsten und wunderbarsten Formen entstand und noch weiter entsteht.«

Gott – so seine Botschaft im Schlusskapitel – wirke durch seine Gesetze. »Dieses Zugeständnis an die Schöpfungstheorie war ein Kompromiss«, erklärt Kutschera. »Darwin wollte die Kreationisten des 19. Jahrhunderts nicht zu stark provozieren.« Ein Zugeständnis, das allerdings auch Widerspruch hervorrief. Die Biophilosophin Engels meint dazu: »Einigen Zeitgenossen ging Darwins Argumentation nicht weit genug. Sie haben es ihm übel genommen, dass er sich in seinem Artenbuch nicht auch zum Ursprung des Lebens geäußert hat.«

Die Organismen verändern sich allmählich in vielen kleinen Schritten

Während seiner Reise mit der Beagle wurde Charles Darwin in Chile Zeuge einer riesigen Naturkatastrophe: Eines Morgens – er hatte sich nach einem morgendlichen Spaziergang gerade zur Erholung auf den



Skeleton of Mylodon robustus
Fig. 2. Bradypus tridactylus
On a Scale of 2 inches to a foot.

Boden gelegt – begann die Erde unter ihm für rund zwei Minuten zu beben. Was wirklich geschehen war, erkannte er aber erst, als er wenige Tage später Concepción erreichte. Die Stadt am Fuße der Anden war nahezu vollständig zerstört, überdies hatte sie nach dem verheerenden Beben auch noch ein mehrere Meter hoher Tsunami überrollt. Tausende Menschen hatten ihr Leben verloren. Darwin versuchte die Ursache der Katastrophe zu ergründen. Der Kapitän der »Beagle« wies ihn auf Muschelbänke auf einer nahe gelegenen Insel hin, die oberhalb der Flutlinie lagen und eben erst zu faulen begonnen hatten. Gleich um mehrere Fuß, schloss Darwin, musste sich das Land aus dem Meer emporgehoben haben. Diese Beobachtung gehörte zu den entscheidenden Eindrücken, die Darwins Denken formten.

RIESENFAULTIER

In Südamerika entdeckte Darwin riesige Skelette von ausgestorbenen Tieren, beispielsweise von Riesenfaultieren. Diese später anhand der Fossilien von Richard Owen (1804–1892) gezeichnete Rekonstruktion zeigt die Ähnlichkeit mit heutigen Faultieren.

RICHARD OWEN: SKELETON OF MYLODON ROBUSTUS, 1842 / PUBLIC DOMAIN

Schon in der ersten Zeit seiner Reise hatte er während der langen Phasen auf dem Meer – wann immer es seine Seekrankheit zuließ – die »Principles of Geology« von Charles Lyell (1797-1875) studiert. Darin beschreibt der schottische Geologe eine Welt im permanenten Wandel, angetrieben von gestalterischen Kräften wie Erdbeben, Erosion und Vulkanismus, die das Antlitz unseres Planeten über die Jahrtausende geformt haben und noch heute wirken – allerdings nicht kataklysmisch wie in Georges Cuviers (1769-1832) damals vorherrschender Katastrophentheorie beschrieben, sondern in einem graduellen Prozess. Die Landmassen sieht Lyell in zusammenhängender Bewegung: Steigen sie in einem Gebiet empor, müssen sie an anderer Stelle absinken.

Darwin hatte auf seiner Reise schon vorher Indizien gefunden, die Lyells neuartige Ansichten zu stützen schienen. Doch die Katastrophe von Concepción überzeugte ihn: Gebirge wie die Anden, so schloss er daraus, hatten sich nicht in einem einzigen, kolossalen Umbruch aufgefaltet, sondern wuchsen, kaum merklich, im Verlauf von Jahrtausenden, als Ergebnis unzähliger kleiner Hebungen wie jener, deren Zeuge

er nun selbst geworden war. »Von Lyell inspiriert begann Darwin, die Welt in einem langsamen Wandel begriffen anzusehen«, urteilt John van Wyhe.

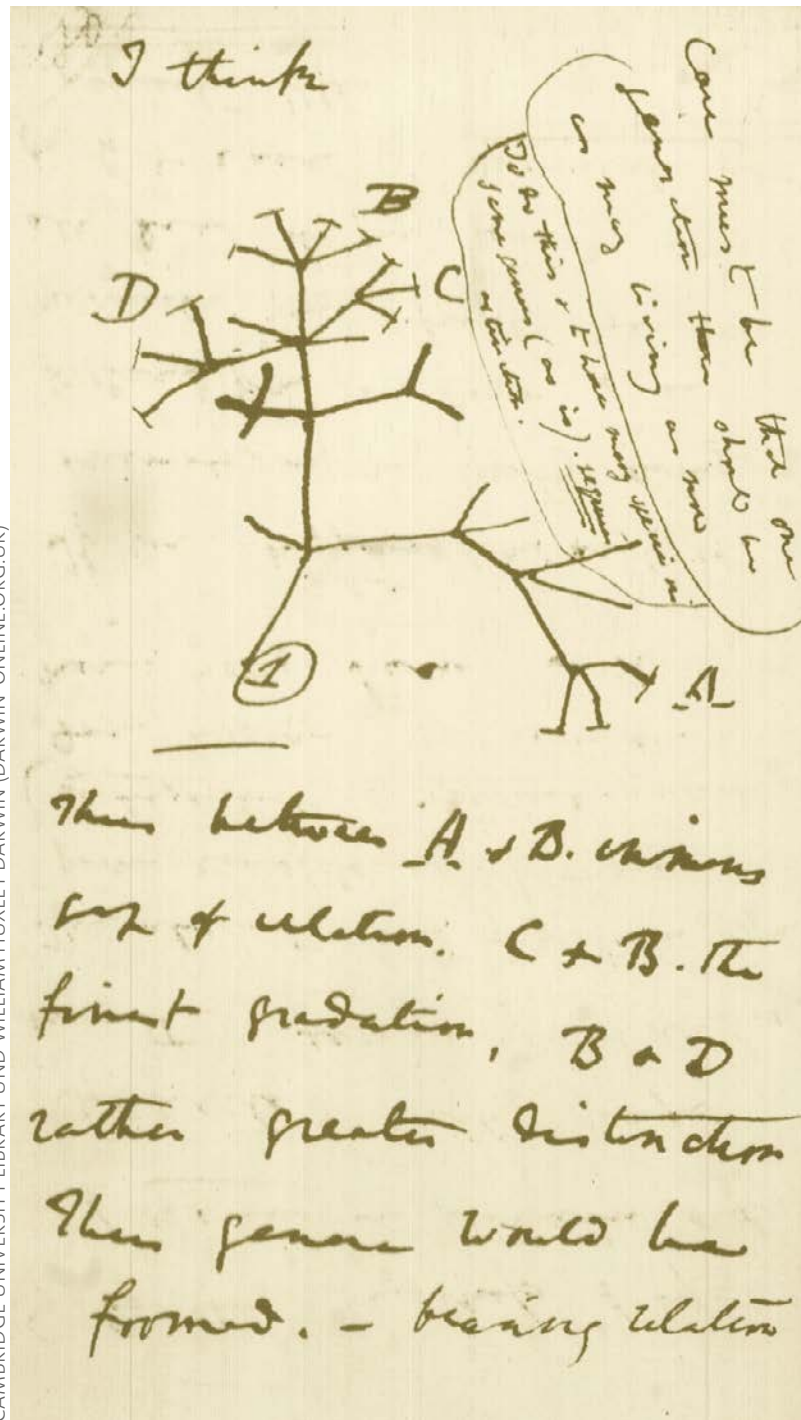
Auch den Wandel und die Entstehung von Arten verstand Darwin als graduellen Prozess, wovon ihn zunächst vor allem seine Beobachtungen auf dem südamerikanischen Kontinent überzeugten. Allerdings erlaubten ihm die lückenhaften Fossilien-sammlungen zu seiner Zeit noch nicht, zu erklären, wie neue Organe zu Stande kommen. Er selbst äußert sich dazu in der »Origin« durchaus selbstkritisch: »Wenn man zeigen könnte, dass irgendein komplexes Organ existiert, das nicht durch zahlreiche aufeinander folgende, geringfügige Modifikationen gebildet worden ist, würde meine ganze Theorie zusammenbrechen.« Er vermochte sich zum Beispiel nicht vorzustellen, wie sich etwa das Auge durch natürliche Ausleseprozesse entwickelt haben könnte – ein selbstkritischer Einwand, den noch heute Evolutionskritiker, vor allem Kreationisten, gern zitieren.

Tatsächlich aber konnten Forscher in den vergangenen Jahrzehnten bei ausgewählten Organismengruppen die Evolution von Augen rekonstruieren – etwa am

Beispiel der Mollusken oder Weichtiere, zu denen auch die Tintenfische mit ihren großen Linsenaugen gehören. So besitzen die im Meer lebenden Napfschnecken der Gattung *Patella*, die sich von Algen ernähren und sich bei Ebbe oder Gefahr auf steinigem Untergrund festheften, nur Becheraugen zur Unterscheidung von Licht und Schatten, während die räuberischen, ihre Opfer anbohrenden Purpurschnecken der Gattung *Nucella* über komplex aufgebaute Linsenaugen verfügen, mit denen sie ihre Beute gezielt aufspüren. Daneben stießen Forscher auf verschiedenste Zwischenformen dieser beiden Extreme, anhand derer die Evolution des Auges bei den Weichtieren deutlich wird.

Alle Lebewesen haben einen gemeinsamen Ursprung

Ein Jahr nach seiner Rückkehr nach England überschrieb Charles Darwin eine Seite in einem seiner geheimen Notizbücher zum Artenwandel mit den Worten: »Ich denke.« Doch seine folgende Erklärung fasste er nicht in Worte, sondern skizzierte sie mit wenigen Federstrichen in einem halbseitigen Diagramm. Was er hier zu Papier gebracht hat, erzählt vom Entstehen



SKIZZE ARTENSTAMMBAUM

Diese Skizze eines Artenstammbaums zeichnete Darwin schon 1837, ein Jahr nach seiner großen Reise, in ein Tagebuch. Darüber schrieb er: »I think« (Ich denke).

und Vergehen der Arten: Ausgehend von einem Ursprungspunkt zeichnete er eine Linie, von der mehrmals in ungleichmäßigen Abständen seitlich Striche abzweigen, die sich wiederum verästeln. Die Verzweigungen markieren die Auftrennungen von Arten; mit einem Querstrich abgeschlossene Linien stehen für heutige Spezies, lose Enden dagegen für ausgestorbene Arten wie die von ihm in Patagonien entdeckten Riesensäugetiere.

Die kleine Skizze symbolisiert die Metapher von einem Stammbaum des Lebens, die Entwicklung aller Lebewesen ausgehend von einem gemeinsamen Ursprung. »Darwins Konzept von einer gemeinsamen Abstammung hat die Genealogie beflügelt«, urteilt der Paläontologe Kevin Padian. »Das regte eine verstärkte Suche nach den nächsten Verwandten von Lebensformen und nach den gemeinsamen Vorfahren an.« Zudem erklärte die Deszendenztheorie, warum sich die Organismen in Gruppen mit gleichen Bauplänen sortieren lassen.

Eine solche Strichskizze fand später als einzige Abbildung Aufnahme in Darwins Artenbuch. Dieser Stammbaum sei allerdings sehr abstrakt und habe die Fachwelt

kaum beeindrucken können. Darauf weist Ulrich Kutschera in seinem Lehrbuch »Evolutionsbiologie« hin. Den ersten anschaulich aus einer Wurzel heraus entspringenden Stammbaum – der eigentlich wie ein sich stark verzweigender Busch aussah – publizierte 1866 der deutsche Zoologe Ernst Haeckel (1834-1919). Bis 1874 wurde daraus bei ihm ein knorriger Baum mit dickem Stamm und vielen verzweigten Ästen. Anders als Haeckel – der den Menschen gleich mit einordnete und ihn zu den Säugetieren an die Spitze der Primaten setzte, womit er den Protest religiöser Kreise provozierte – schloss Darwin den Menschen in seinem »Origin«-Buch zunächst aus. Vermutlich entschied er so aus taktischen Gründen und auch aus Rücksicht auf seine religiöse Frau. Allein ein ebenso vorsichtig wie doppeldeutig formulierter Satz lässt seine wahre Gesinnung erkennen: »Licht wird auch fallen auf den Menschen und seine Geschichte«, heißt es im Schlusskapitel.

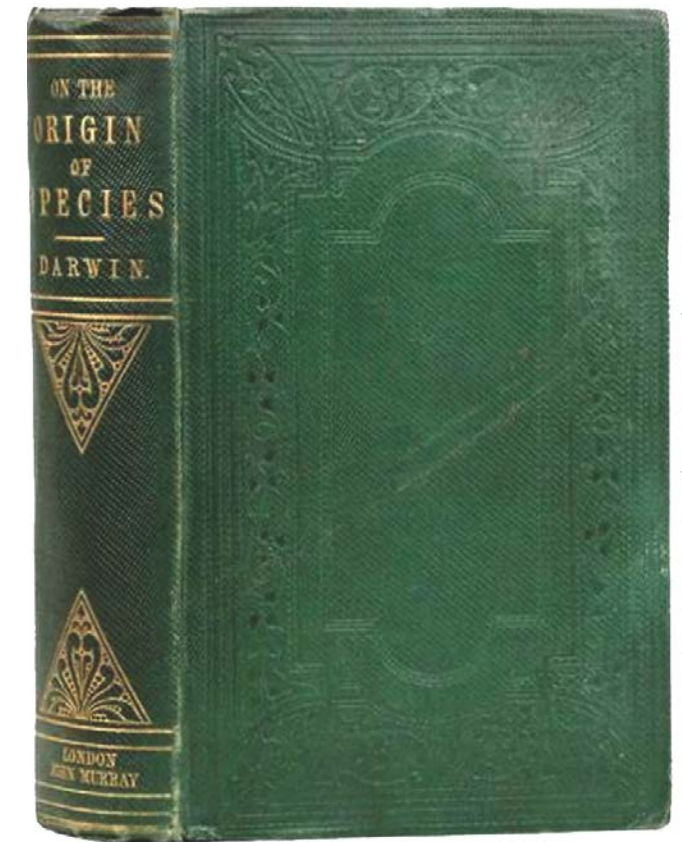
Zu den Ursprüngen unserer eigenen Spezies äußerte er sich erst 1871 in seinem Werk »Die Abstammung des Menschen«. In der Einleitung begründet er die Verzögerung: »Viele Jahre hindurch habe ich Noti-

zen über den Ursprung oder die Abstammung des Menschen gesammelt, ohne dass mir etwa der Plan vorgeschwebt hätte, über den Gegenstand einmal zu schreiben, vielmehr mit dem Entschluss, dies nicht zu tun, da ich fürchtete, dass ich dadurch nur die Vorurteile gegen meine Ansichten verstärken würde.« Dennoch polarisierte die »Affenfrage« die britische Gesellschaft von Anfang an. Ende Juni 1860 kam es in der Versammlung der British Association for the Advancement of Science in Oxford zu einer denkwürdigen Konfrontation der beiden gegnerischen Lager. Darwin selbst war wegen seines chronischen Magenleidens nicht anwesend. Es ging heftig zu. Die Rede des Bischofs von Oxford, Samuel Wilberforce (1805-1873), der selbst Ornithologe war, gipfelte in der Frage, ob Darwins enger Freund, der Zoologe Thomas Henry Huxley (1825-1995), auf Seiten seines Großvaters oder seiner Großmutter vom Affen abstammte, worauf dieser konterte: »Wenn die Frage an mich gerichtet wurde, ob ich lieber einen miserablen Affen zum Großvater haben möchte oder einen durch die Natur hoch begabten Mann von großer Bedeutung und hohem Einfluss, der aber diese Fähigkeiten und diesen Einfluss nur

dazu benutzt, um Lächerlichkeit in eine ernste wissenschaftliche Diskussion einzutragen, dann würde ich ohne Zögern meine Vorliebe für den Affen bekräftigen.«

Treibende Kraft der Evolution ist die natürliche Auslese

Mit dem Konzept der Selektion (*natural selection*) fand Darwin eine plausible Erklärung für Evolutionsvorgänge auf der Grundlage von Veränderlichkeit und Bevölkerungsüberschuss. Das Selektionsprinzip wurde damals gleich zweimal erkannt: Charles Darwin und der britische Naturforscher Alfred Russel Wallace (1823-1913) ließen sich vom gleichen Buch inspirieren – dem zuerst 1798 erschienenen Werk »An Essay on the Principle of Population« (»Versuch über das Bevölkerungsgesetz«) des Engländers Thomas Malthus (1766-1834). In seinem düsteren Bericht erörtert der englische Nationalökonom und Sozialphilosoph, weshalb das Wachstum der Bevölkerung die Zunahme der Nahrungsmittelressourcen stets übersteigen müsse, wodurch Übervölkerung und Versorgungsknappheit unvermeidlich würden, sofern nicht Naturkatastrophen oder Kriege die Einwohnerzahl einer Gesell-



ÜBER DIE ENTSTEHUNG DER ARTEN

Vor 150 Jahren erschien Charles Darwins berühmtestes Buch – die Kurzfassung eines wesentlich umfangreicher geplanten Werks.

schaft dezimierten. Unabhängig voneinander übertrugen Darwin und Wallace Malthus' Übervölkerungslogik auf die Natur, wo demnach ein »Kampf ums Dasein« (*struggle for existence*) herrsche. (Darwin verwendete dafür auch den Ausdruck *struggle for life*). »Dieser Begriff ist durch einen bis heute nicht korrigierten Übersetzungsfehler falsch interpretiert worden«,

erklärt Kutschera. Der Daseinswettbewerb – so die treffendere Übersetzung – bezieht sich demnach vor allem auf den Fortpflanzungserfolg der einzelnen Individuen im Vergleich zueinander in ein- und derselben Population.

Dass es einen *struggle for existence* geben müsse, vermuteten bereits Philosophen des 18. und frühen 19. Jahrhunderts, darunter Georges Buffon (1707-1788) und Johann Gottfried Herder (1744-1803). Aber für sie herrschte ein Wettbewerb zwischen den Arten, etwa zwischen Wolf und Schaf. Als Darwin im Jahr 1838 Malthus las, erkannte er, dass der wahre Existenzkampf zwischen den Individuen derselben Art, ja sogar innerhalb derselben Population stattfindet. Einige Individuen sind demnach gegenüber anderen Artgenossen im Vorteil, weil sie über Eigenschaften verfügen, die ihre Überlebenschancen bei gegebenen Umweltbedingungen verbessern. Damit erhöhen sich zugleich auch ihre Chancen auf Nachwuchs, so dass diese vorteilhaften Adaptationen über die Generationen weitervererbt werden können.

In späteren Auflagen der »Origin« umschrieb Darwin diese Zusammenhänge auch mit der Wendung *survival of the fit-*

test (»Überleben des Tauglichsten«), die er von dem britischen Philosophen Herbert Spencer (1820-1903) übernahm. »Aber schon Darwin war fest davon überzeugt, dass die natürliche Auslese nicht der einzige Evolutionsfaktor sein kann«, merkt Padian an. Mit seiner Theorie der so genannten sexuellen Selektion – wobei in der Regel die Männchen um die Weibchen konkurrieren beziehungsweise die Weibchen zwischen mehreren Männchen wählen – unterbreitete Darwin einen weiteren Mechanismus, den er vor allem in seinem späten Werk »Über die Abstammung des Menschen« ausführlich erörterte. »Die Unterschiede zwischen den Geschlechtern konnten mit der Theorie der sexuellen Zuchtwahl erstmals als Ergebnis eines Wettbewerbs mehrerer Männchen um ein Weibchen erklärt werden und nicht als Ausdruck eines göttlichen Schöpfungsakts«, urteilt Padian.

Heute sind die Forscher davon überzeugt, dass neben der natürlichen und der geschlechtlichen Auslese noch andere Mechanismen die Evolution vorantreiben – so etwa die genetische Drift. Dadurch häuft sich manchmal zufällig eine Genvariante besonders an – vor allem in kleinen Popu-

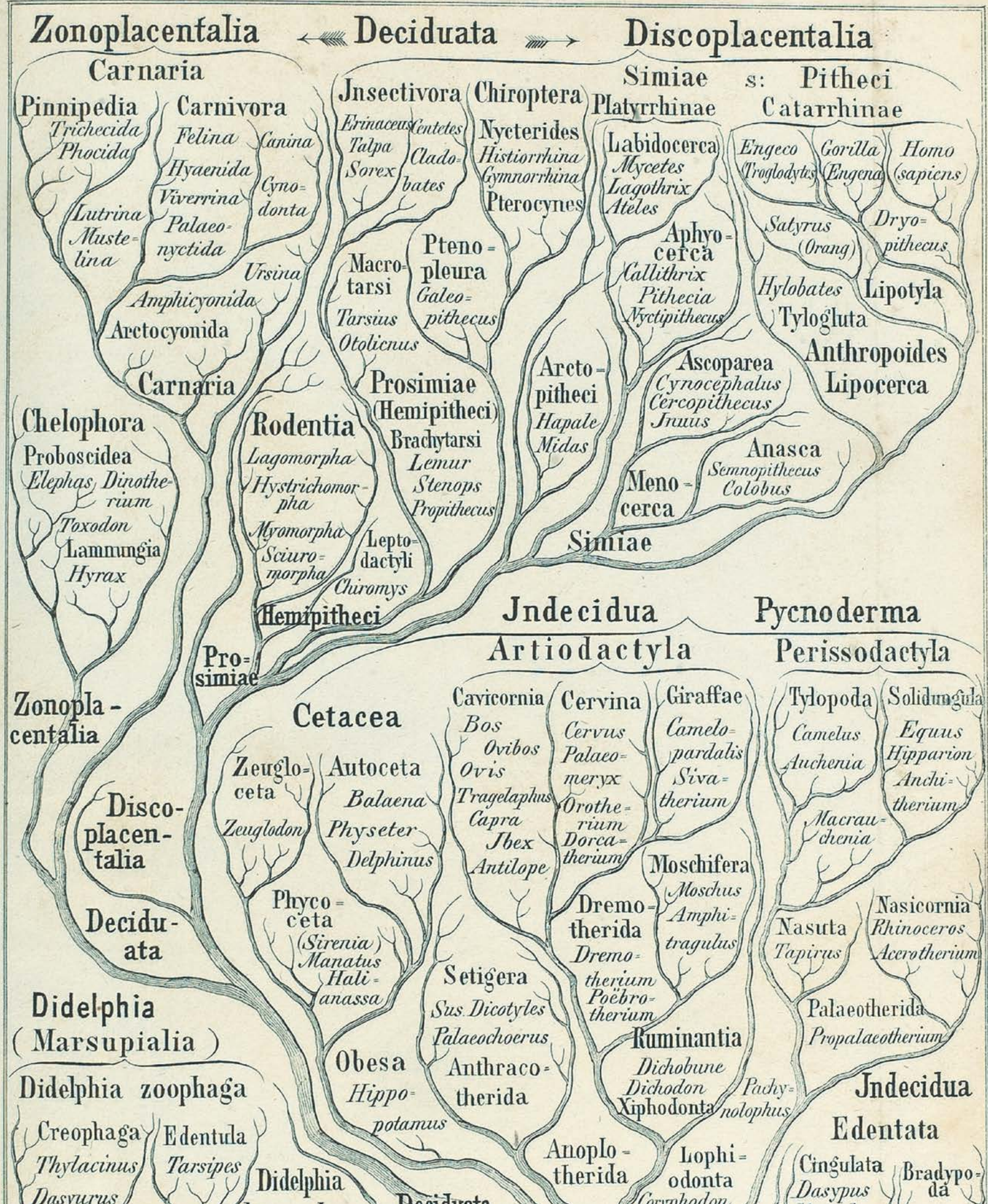
lationen, wo sie stark wirkt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist zwar sehr gering, dennoch gilt die genetische Drift heute als ein wichtiger Evolutionsfaktor. »In kleinen Populationen könnte die genetische Drift deshalb womöglich sogar noch stärker wirken als die Selektionsmechanismen«, erklärt der Evolutionsbiologe Axel Meyer von der Universität Konstanz. Ihre Bedeutung relativ zu anderen Evolutionsprozessen sei aber noch nicht abschließend geklärt.

Einen Kernaspekt in Darwins Selektionstheorie bildet seine Beobachtung, dass gleichartige Lebewesen variieren und dass jedes Individuum einzigartig ist. In der »Origin« widmet er diesem Thema, mit dem er sich auch selbst ausgiebig praktisch an Tauben befasste, gleich die ersten beiden Kapitel. Allerdings entwickelte Darwin nur sehr verschwommene Vorstellungen zur Erbllichkeit von Eigenschaften und zur Herkunft von Mutationen. Wie hätte er wohl reagiert, hätte er die Arbeit, die Mendel ihm zugesandt hatte, aufgeschnitten und gelesen? Erst im frühen 20. Jahrhundert entdeckten Forscher diese Erbgeregeln neu und ergründeten sie tiefer, und erst ein paar Jahrzehnte danach entwarfen Populationsgenetiker Modelle, in denen Ge-



DOWN HOUSE IN KENT

Seit 1842 lebte und arbeitete Darwin meist sehr zurückgezogen in dem Wohnsitz »Down House«, einem Anwesen bei dem abgeschiedenen Weiler Down in Kent, zwei Fahrstunden von London. Von dort pflegte er allerdings eine umfangreiche weltweite Korrespondenz.



netik und Evolution zusammenstimmen – wohlgemerkt auf der Basis von Darwins grundlegenden Ideen. Als Hauptvertreter dieser neuen »Synthetischen Theorie der Evolution« gilt der deutschamerikanische Forscher Ernst Mayr (1904-2005).

Im Lauf der Zeit wächst die Lebensvielfalt

Mit seinem Buch wagte sich Darwin an das »Geheimnis aller Geheimnisse«: das Auftreten neuer Arten, wie Darwin selbst in der Einleitung schrieb. Er sammelte viele Belege zu lange ausgestorbenen Organismen und zu jungen Spezies. Doch obwohl er die Ansicht vertrat, dass die Artenzahl in der Evolution wächst, hat er sich mit den Ursachen und Mechanismen der Aufspaltung von Arten – einem Kernthema der späteren Evolutionsbiologie – nach Ansicht einiger Wissenschaftshistoriker we-

STAMMBAUM 1866 HAECKEL

Der Jenaer Forscher Ernst Haeckel plakatierte Darwins Thesen und entwickelte sie auf eigene Art weiter. Hier ein Ausschnitt seines Stammbaums von 1866, der den Menschen einschließt.

UNIVERSITÄT JENA, ERNST-HAECKEL-HAUS

nig befasst. Stärker interessierte ihn die Anpassung, die Adaptation von Arten.

»Entgegen dem Buchtitel definierte er den Begriff ›Art‹ allerdings nicht«, betont Kutschera. Offenbar war ihm das nicht vorrangig wichtig, obwohl er durchaus einiges dazu sagte. Darwin schrieb etwa: »Ich betrachte den Ausdruck Spezies als einen arbiträren und der Bequemlichkeit halber auf eine Reihe einander sehr ähnliche Individuen angewendeten, und glaube, dass er vom Ausdruck Varietät nicht wesentlich

verschieden ist.« Andere Forscher – allen voran Ernst Mayr, der das so genannte biologische Artkonzept entwickelte – betonten später die Bedeutung der Biospezies in Evolutionsprozessen, weil sie die Fortpflanzungseinheiten darstellen. Eine endgültige Definition, was eine Art sei, steht jedoch noch immer aus.

»Darwin hat nur wenig zum Verständnis der Art beigetragen«, sagt auch Axel Meyer. »Ebenso wenig hat er klare Hypothesen zur Artbildung vorgelegt, seine Aus-

führungen blieben relativ vage.« Darwins Vermutung, dass Selektionsprozesse nicht nur verbesserte Anpassungen hervorbringen, sondern durch schrittweise Veränderungen auch aus einer Art eine andere machen können, ist heute weitgehend

GALAPAGOSINSELN

Wie viel Aufschluss über die Evolution von Arten die Galapagosinseln liefern, erkannte Darwin erst nach seiner Reise.



anerkannt. Doch wie, unter welchen Bedingungen oder durch welche Prozesse sich Arten aufspalten können, blieb unklar. Spätere Forscher vertraten den Standpunkt, dass sie zunächst begreifen müssen, was Arten überhaupt sind, wenn sie deren Evolution verstehen wollen. Wesentlich gründlicher als Darwin thematisierten sie als Muster der Artenzunahme die Auftrennung und Abspaltung von Entwicklungslinien.

Als wichtigsten Ursprung für die Artbildung erkannten Ernst Mayr und andere die Isolation von Populationen durch neue geografische Barrieren. (Biologen nennen das allopatrische Speziation – im Gegensatz zur sympatrischen, bei der eine Art aufspaltung ohne geografische Trennung erfolgt, ein noch strittiger Vorgang.) So kann etwa ein frisches Gebirge inmitten des Verbreitungsgebiets eine Spezies teilen – oder eine Teilpopulation findet sich auf einer Insel wieder, wie vermutlich bei vielen Galapagosvögeln geschehen. Genetisch entwickeln sich solchermaßen räumlich getrennte Populationen langsam auseinander – und zwar mit der Zeit so weit, dass sie sich schließlich nicht mehr miteinander paaren, sollten sie jemals wieder in

direkten Kontakt treten. Nach Mayrs Artkonzept handelt es sich dann um verschiedene Spezies. »In jüngster Zeit mehren sich allerdings die Anzeichen, dass auch eine sympatrische Speziation häufiger vorkommen könnte als bislang angenommen«, sagt Meyer – also die Veränderlichkeit innerhalb desselben Habitats. Dem fügt der Konstanzer Evolutionsforscher hinzu: »Die Bedeutung der natürlichen Selektion bei der Artbildung gegenüber neutralen Prozessen ist allerdings noch sehr umstritten.«

Ein Phänomen, das die meisten Biologen noch vor Jahrzehnten für absurd gehalten hätten, gilt inzwischen als sicher: Leben, das auf Zellen mit einem Zellkern beruht, fußt auf dem Verschmelzen zweier einfacher strukturierter, bakterienartiger Organismen (einer so genannten Symbiogenese). Ähnlich erwarben zellkernhaltige Organismen auch manche ihrer Organeln, zum Beispiel Pflanzenzellen ihre Chloroplasten. Vor allem neue genetische Erkenntnisse versprechen Einblicke in diese großen evolutionären Veränderungen. Schon jetzt haben sie manche Überraschung gebracht. Warum Charles Darwin allerdings so lange gewartet hat, bis er sei-

ne revolutionären Theorien veröffentlichte, gibt bis heute Anlass zur Spekulation. Hatte er seine Theorien womöglich deshalb zurückgehalten, weil er um seinen Ruf als Wissenschaftler fürchtete? »Dafür gibt es keinen Beweis«, meint John van Wyhe. »Vielmehr ist es wahrscheinlich, dass Darwin von seinen anderen Projekten so in Anspruch genommen war, dass er schlichtweg keine Zeit dafür hatte.« Er schrieb seinen Bericht über die Reise mit der »Beagle«, erklärte die Entstehung von Korallenriffen und verfasste nach jahrelanger Sezierarbeit eine mehrbändige Monografie über die skurrile Lebensform der Rankenfußkrebse (zu denen unter anderem Seepocken und Entenmuscheln gehören), die ihm im Jahr 1853 die Königliche Medaille der Royal Society einbrachte. Nachdem am 1. Juli 1858 Auszüge seiner Schriften gemeinsam mit einem Aufsatz Wallaces vor der Linnean Society verlesen worden waren, konnte es ihm aber nicht schnell genug gehen: Unter chronischen Magenkrämpfen und Brechreiz stellte er die »Origin« – gewissermaßen ein Auszug aus seinem geplanten mehrbändigen Werk, das er bereits begonnen hatte – binnen weniger Monate fertig.

»Das Buch ist didaktisch ungeschickt aufgebaut und enthält zahlreiche Widersprüche«, bemerkt Ulrich Kutschera. So schreibt Darwin einmal etwa zur Frage, ob Evolution nach Perfektion strebe: »Da die natürliche Selektion einzig und allein durch und für das Wohl eines jeden Lebewesens arbeitet, werden alle körperlichen und geistigen Anlagen dazu tendieren, sich in Richtung Perfektion zu entwickeln.« An anderer Stelle heißt es dagegen: »Die natürliche Selektion versucht nur, jedes organische Wesen ebenso vollkommen oder noch etwas vollkommener zu machen als die übrigen Bewohner desselben Gebiets, mit denen es in Wettbewerb tritt.« Was gilt? »Zunächst stellt sich die Frage, wie Perfektion jeweils überhaupt definiert werden soll. Ferner spricht gegen den Trend der Optimierung, dass sich der Selektionsdruck oft mit jeder neuen Generation ändert«, gibt Axel Meyer zu bedenken. »Was heute perfekt ist, kann sich morgen als unvorteilhaft erweisen, etwa weil sich die Umweltbedingungen geändert haben.« Um zu überleben und sich – als wichtigstes Zielkriterium – auch fortzupflanzen, müssen Organismen eine Vielzahl an Funktionen erfüllen. Würden jedoch einzelne Eigen-

schaften perfektioniert, ginge dies möglicherweise auf Kosten anderer Funktionen.

Auch der Mensch ist ja alles andere als perfekt: »Unser Auge ist beispielsweise ein einziger Kompromiss: Kein Ingenieur hätte es so konstruiert, denn seine sensorischen Zellen sind vom Licht abgewandt«, erklärt Meyer. Von Perfektionsstreben als Ausdruck unendlicher Kreativität der Evolution kann also keine Rede sein. Vielmehr muss die Evolution mit dem auskommen, was bereits vorhanden ist, und auf dieser Grundlage eine möglichst optimale Funktionalität erzielen.

Die Lesungen im Sommer 1858 vor der Linnean Society von zwei Darwintexten und anschließend dem Manuskript von Wallace – das Darwin von dem jüngeren Forscherkollegen zur Weiterleitung und Veröffentlichung zugeschickt worden war – sollen damals bei den Mitgliedern wenig Beachtung gefunden haben. Am Jahresende notierte die Vereinigung, das Jahr sei »ohne eine jener Entdeckungen vergangen ..., die eine Forschungsdisziplin revolutionieren«.

Angesichts des Aufruhrs, den Darwins Buch »Über die Entstehung der Arten« schon ein Jahr später in weiten Kreisen her-

vorrief, mag man dies heute kaum glauben. Zwar kommentiert Kutschera: »Da Darwin weder die Gesetze der Vererbung noch das Prinzip der Symbiogenese kannte, hat sein Artenbuch mit unserer heutigen Sicht vom Verlauf der Evolution nur noch wenig gemeinsam.« Dennoch bilden vor allem Darwins Theorien das Fundament, auf dem sich die Biologie als wissenschaftliche Disziplin aufbaute. Axel Meyer betont: »Darwins Einsicht, dass die natürliche Selektion die kreative Hauptkraft der Evolution darstellt, bleibt nach 150 Jahren als wissenschaftlich erwiesen bestehen.« <

(Spektrum der Wissenschaft, 2/2009)

Desmond, A., Moore, J.: Darwin. Rowohlt, Reinbeck 1994.

Engels, E.: Charles Darwin. C.H.Beck, München 2007.

Kutschera, U.: Evolutionsbiologie. 3. Aufl. Ulmer UTB, Stuttgart 2008.

Mayr, E.: Das ist Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin 2000.

Neffe, J.: Darwin. Das Abenteuer des Lebens. C. Bertelsmann, München 2008.

Sentker, A., Wigger, F. (Hg.): Vielfalt, Wandel, Menschwerdung. Zeit Wissen Edition.

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008.



BAKTERIENEVOLUTION

WIE DAS EINHORN ZU SEINEM HORN KAM

von Heather Hendrickson & Paul B. Rainey

Es ist lehrreich, Bakterienpopulationen über Tausende von Generationen zu beobachten: Ganz neue Fähigkeiten kommen zum Vorschein, wenn alte Gene sich neu sortieren und verstärken.

Evolutionssprünge – etwa die Entwicklung des Fliegens, des Auges oder einer Blüte – sind die Basis der Vielfalt allen Lebens. Gleichzeitig sind Ursprung und Ablauf solcher Sprünge aber nicht leicht zu erklären; schon deshalb, weil sie vor sehr langer Zeit unter ziemlich ungewissen Umständen begannen. Ungeachtet solcher Schwierigkeiten liefert [ein Forscherteam um Zachary Blount von der Michigan State University in East Lansing](#) nun molekulare Details zu einer dieser umwälzenden Neuerungen [1]: einem zuvor nicht existenten neuen Phänotypen, der nach 30 000 Generationen erstmals in einer Bakterienkultur auftrat. Mittlerweile haben die Forscher sich ein komplettes Bild der zu Grunde liegenden genetischen Veränderungen machen können. Davor mussten sie allerdings lernen, Ahnformen von Keimen in einem Entwicklungsstand einzufrieren und zu sequenzieren – das ermöglichte es am Ende, den evolutionären Sprung nachzuvollziehen.

Die »Synthetische Evolutionstheorie«, der derzeit gängige Ansatz der Evolutions-

beschreibung, vereint den [Gradualismus](#) von Charles Darwin – also die Ansicht, Evolution schreite durch graduelle Veränderungen voran – mit dem mendelschen Konzept von Genen als diskreten Einheiten, an denen die Evolution ansetzt. Diese Vorstellung sah sich einiger Kritik ausgesetzt, denn schließlich ist ein Prinzip nur schlecht fassbar, das mit allmählichen, mutationsbedingten Änderungen das plötzlichen Auftreten ganz neuer Phänotypen erklären soll [2, 3]. Welche kleinen Schritte könnten etwa einem Sprung wie der Erfindung des Konstruktionsprinzips »Auge« vorausgehen? Eine mehr als nur philosophische Frage: Antworten darauf, also Erklärungen zum Beginn und Ablauf evolutionärer Innovation, sind unverzichtbar, um auf der mechanistischen Ebene verständlich zu machen wie Evolution funktioniert. Zacharias Blount und seine Kollegen geben nun solche Antworten.

Der Leiter ihrer Arbeitsgruppe, Richard Lenski, hatte 1988 das mittlerweile am längsten andauernde Evolutionsexperiment aller Zeiten angestoßen. Es begann

mit einem Klon von *Escherichia coli*, also einer Gruppe genetisch identischer, von einem Stammkeim abgeleiteter Zellen. Lenski gründete daraus zwölf voneinander isolierte Kolonien in zwölf Kulturgefäßen, die in einem simpel zusammengesetzten Nährmedium mit Glukose als alleiniger Kohlenstoffquelle schnell heranwachsen. Seit nunmehr 25 Jahren transferieren die Wissenschaftler nun fast täglich einen Teil der Kulturen in wieder neue Gefäße; jede Population hat mittlerweile 55 000 Generationen durchlaufen. Außer den täglichen Transfers wurden aber auch regelmäßig Proben bei minus 80 Grad Celsius eingefroren und so ein detailliertes Archiv historischer Ahnformen der Stämme angelegt – ein Register von Vorläufern mit einzigartigem Vorteil gegenüber Fossilien, denn die Vorfahren können jederzeit wieder durch Erwärmen zum Leben erweckt werden.

[Die Erkenntnisse der zwölf Stämme](#)

Zwar war Lenskis Team schon in der Frühphase des Experiments die eine oder andere zu erhöhter Fitness führende Adaption

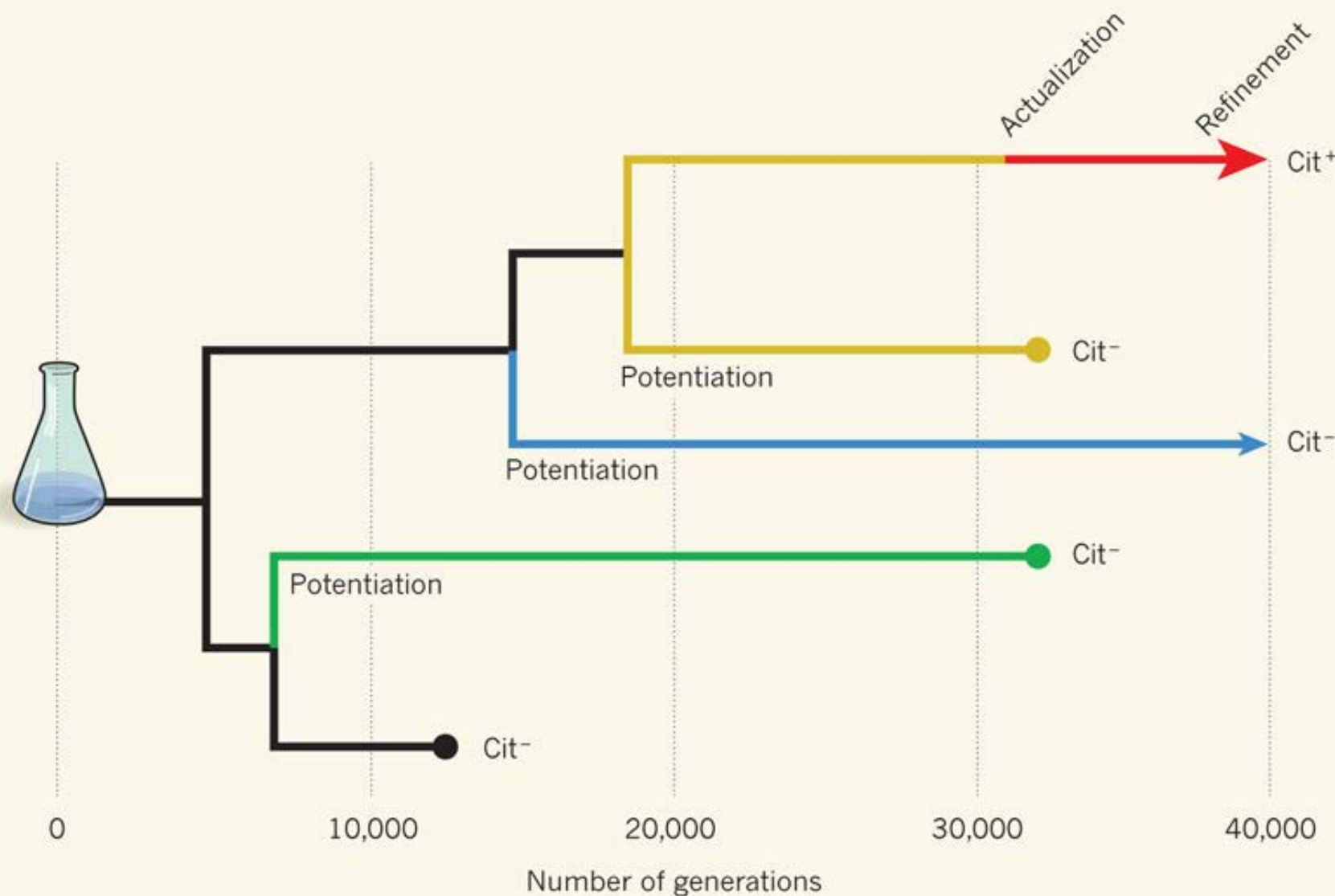


aufgefallen – nach 31000 Generationen aber tat sich Dramatisches. Eine der Populationen namens Ara-3 hatte die Fähigkeit erworben, Zitrat als Nährstoffquelle zu nutzen [4]. Das im Nährmedium enthaltene Zitrat fungiert als Chelatbildner und erleichtert die Eisenaufnahme. Zwar verstoffwechseln *E.-coli*-Keime unter anaeroben Bedingungen gelegentlich auch Zitrat, um Energie zu gewinnen, in aller Regel geschieht dies jedoch unter aeroben Bedingungen wie jenen im Langzeitexperiment

nie. Dass eine Kultur unter diesen Umständen trotzdem Zitrat verarbeitet, verdeutlicht, dass neue Gene nicht immer auch ganz neu erfunden werden müssen. Im Gegenteil bedient sich die Evolution aus dem Grundstock bereits verfügbaren Materials: Einem Bakterium stehen sämtliche Bausteine zur Verfügung, die zur Evolution des aeroben Zitratstoffwechsels notwendig sind; um diese Möglichkeiten auch zu nutzen, müssen dann regulatorische Schaltkreise neu verdrahtet und angepasst werden.

DIE ZWÖLF STÄMME

Die zwölf Kulturflaschen mit den evolvierenden Colibakterien. Die Bezeichnungen auf dem Deckel beziehen sich auf ein Markierungsgen: Sechs der Stämme haben ein funktionstüchtiges Arabinose-Operon, das in Gegenwart bestimmter Chemikalien eine Farbreaktion auslöst, die anderen nicht. Die Markierung soll verhindern, dass unbemerkt Bakterien zwischen zwei Zelllinien übertragen werden.



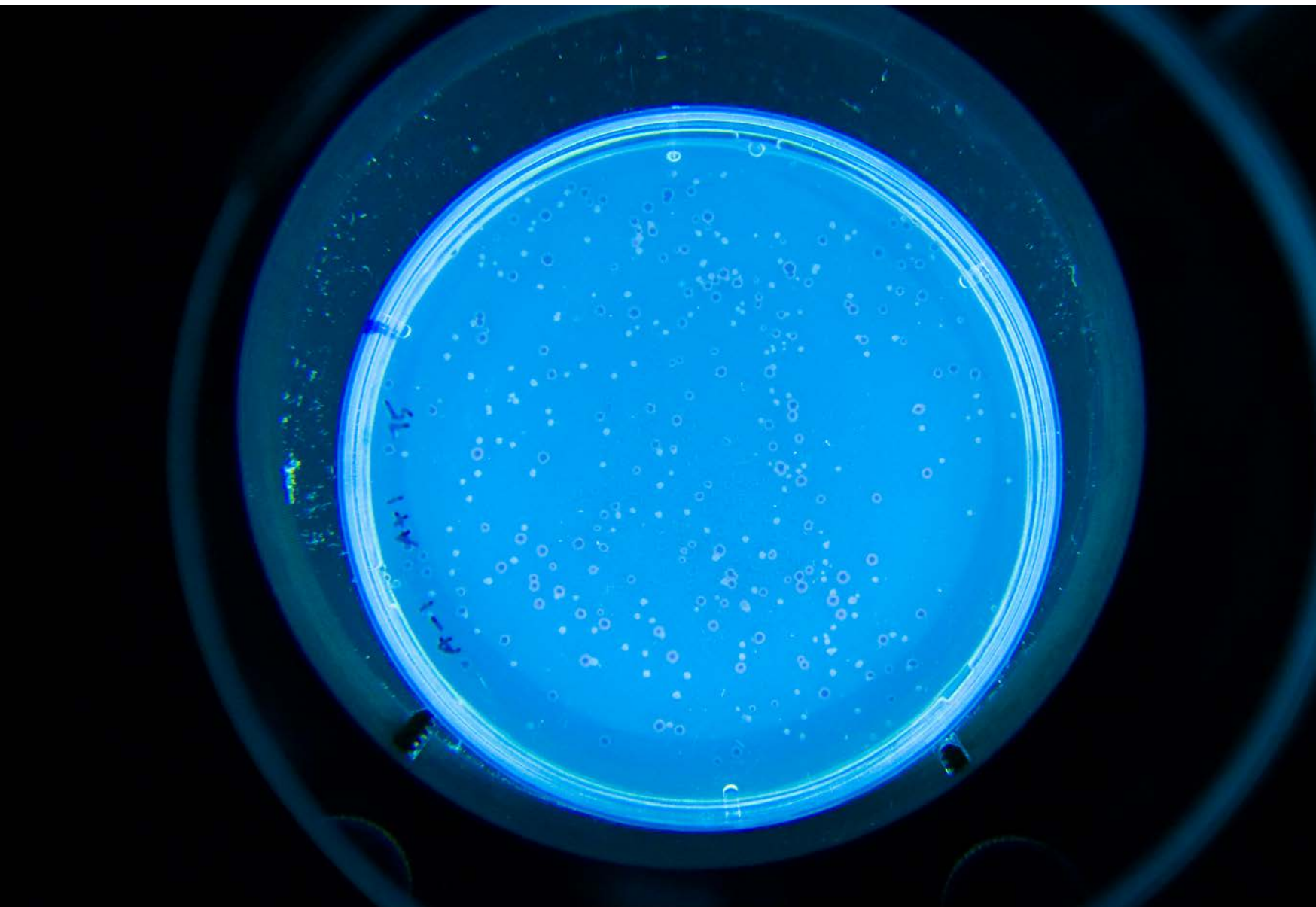
EIN NEUER PHÄNOTYP ENTSTEHT

Richard Lenski hat 1988 einen einzelnen Klon von *E. coli* isoliert und dann in zwölf Gefäße verteilt, jeden Tag werden diese Kulturen seitdem in ein neues Kulturgefäß transferiert. Diese ersten Zellen konnten Zitrat nicht als Nährstoff zur Energiegewinnung umsetzen (Cit⁻), irgendwann einmal entdeckten einige Bakterien dann aber diese Fähigkeit (rot, Cit⁺). Der Orginalklon hatte sich verschiedene konkurrierende Linien aufgespalten, wie nachträgliche Genuntersuchungen belegen. Notwendig waren dafür drei Evolutionsschritte: Eine »ermöglichende« (›potentiating‹) Mutation unbekannter Natur erlaubte den Zellen, eine zweite, die »verwirklichende« (›actualizing‹) Mutation zu erhalten – welche das Rearrangement von ganz bestimmten Genen und ihre Verstärkung möglich macht. Betroffene Keime können nun – noch recht schlecht – auch mit Zitrat als Nahrungsquelle und in Gegenwart von Sauerstoff aufwachsen. Weitere (›refining‹) Mutationen, die dann zum Beispiel eine Duplikation der Gene nach sich ziehen können, machten den Keim dann zum potenten Zitrat-Verstoffwechsler.

Um den genetischen Hintergrund des so genannten »Cit⁺-Phänotyps« zu verstehen – also der Fähigkeit, Zitrat in Gegenwart von Sauerstoff zu nutzen – haben Blount und Co auf ihre archivierten Kühl-schrankkulturen zurückgegriffen: Sie belebten aus verschiedenen Epochen der Ara-3-Linie stammende Cit⁻-Phänotypen wieder und konnten damit den Evolutionsprozess nachvollziehen: Sie erkannten zu-

nächst, dass ein Cit⁺-Phänotyp tatsächlich von der jüngsten Populationslinie abstammte; es dürfte sich demnach darin eine genetische Veränderung ereignet haben, die den Cit⁺-Keimen die Entstehung überhaupt erst möglich machte. Welcher Art diese »befähigende« Mutation war, bleibt vorerst unklar – noch wichtiger ist aber, dass sie tatsächlich stattfand. Der nächste Schritt, der die Stämmen zunächst

nur teilweise zu Cit⁺-Keimen machte, der »Verwirklichungs«-Schritt, war deutlich einfacher festzunageln: Die Forscher entdeckten seine Spur in einer Erbgutregion mit dem Gen *citT*, welches ein Transportprotein kodiert, das Zitrat in die Zelle einschleust. Ursprünglich lag *citT* einmal unterhalb des Genorts von *citG* (einem weiteren für die Zitrat-Verstoffwechselung notwendigen Gen) sowie von *rnk*, einem Gen mit ganz anderem Aufgabenbereich im Energiestoffwechsel. In sämtlichen Cit⁺-Zellen fiel Blount und seinen Kollegen nun aber ein charakteristisches Rearrangement dieser Gene ins Auge, das *rnk* mit *citG* verschmolz. Das führte nun dazu, dass die Expression von *citG* und *citT* unter die Promotorkontrolle von *rnk* geriet. Die Regulatorsequenz dieses Gens erlaubte daraufhin, dass beide *cit*-Gene nun auch in Gegenwart



MICHIGAN STATE UNIVERSITY, G.L. KOHUTH

COLIBAKTERIEN IN EINER KULTURSCHALE

In solchen Petrischalen überprüfte Zachary Blount, ob und wann die Bakterien in der Lage waren, Zitrat zu verdauen. Das Nährmedium enthielt keine Glukose, so dass nur die neue Art an seiner Oberfläche Kolonien bilden konnte.

von Sauerstoff aktiv werden. Damit nicht genug, denn eine einzige Kopie des umarrangierten Genkomplexes reichte nicht aus, den Cit⁺-Phänotypen hervorzubringen; hierzu mussten sich die Gene in Tandems von zwei bis neun Kopien aufstellen. Demnach hatte der Evolutionsprozess schleichend daran gearbeitet, per Genduplikation ein sehr geringes Cit⁺-Potenzial immer weiter und schließlich bis auf ein lebenserhaltendes Niveau auszubauen. Und: Alle Zellen, die einmal die »Verwirklichungs«-Mutation geerbt haben (also die *rnk-cit*-Fusion) und diese Gene dann amplifiziert haben, zeigen schließlich den Cit⁺-Phänotypen.

Die Entdeckung von Lenskis Cit⁺-Mutanten war ein Schlag ins Gesicht all derer, die es für unmöglich gehalten hatten, dass graduelle Schritte über die Mikroevolution völlig andere Phänotypen hervorbringen können. Tatsächlich hatten Gegner der Evolutionstheorie ja gerade das Fehlen erklärender mechanistischer Details weidlich genutzt, um die Möglichkeit »göttlicher Intervention« in den Raum zu stellen. Lenski hatte sich anfangs sehr bemüht, auf kritische Einwände höflich und konstruktiv einzugehen – berühmt wurde er dann

allerdings durch eine öffentliche Gegenrede, die zu einer der fesselndsten und wirkksamsten Repliken im Kampf »Wissenschaft gegen Dogma« zählt. Bekannt wurde daraus etwa das Bonmot [5]: »Anders gesagt: Wir behaupten nicht, wir hätten ein Einhorn durch unseren Garten huschen sehen – eine ganze verdamnte Einhornpopulation lebt in meinem Labor!«

Nachdem man nun einiges über die Schlüsselereignisse weiß, die solchen Einhörnern ihr Horn verpassen, kann man sich den Konsequenzen zuwenden, die dieses Wissen für unser Verständnis von Naturprozessen hat. Natürlich ist die Idee verführerisch, man könne genetische Evolutionsprozesse anhand weniger Regeln verstehen [6]. Das Umwidmen und Amplifizieren von Genpromotoren kann Anpassungen tatsächlich unter verschiedenen Umständen beschleunigen [7,8] – wie umfangreich die so erzielten Umbauten eines Phänotyps ausfallen, ist aber immer auch eine Frage der Vorgeschichte, des Zufalls und glücklicher Gegebenheiten der Genarchitektur. Blount und Co konnten zeigen, dass Evolution jede sich bietende Gelegenheit nutzt, wenn sie Zeit genug bekommt. Ob sich eine Chance bietet, entscheidet

sich allerdings in einer extrem verwickelten Gemengelage sich gegenseitig beeinflussender Vorgänge – womöglich vereitelt das am Ende tatsächlich jede Bemühung, die Natur von »befähigenden« Mutationen vorherzusagen. Positiv ist aber zu konstatieren, dass ein Grundpfeiler der Synthetischen Evolutionstheorie mit den Studien gestärkt wird: Genetische Veränderung ereignet sich tatsächlich graduell. Ein Phänotyp kann sich dagegen recht dramatisch ändern. <

Der Artikel ist unter dem Titel »How the unicorn got its horn« in Nature erschienen.

(Spektrum.de, 2. Oktober 2012)

[1] Blount, Z. et al., Nature 489, S. 513–518, 2012

[2] Pigliucci, M., Phil. Sci. 75, S. 887–898, 2008

[3] Gould, S. J., The Structure of Evolutionary Theory, Belknap 2002

[4] Blount, Z. et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 105, S. 7899–7906, 2008

[5] http://rationalwiki.org/wiki/Lenski_affair

[6] Stern, D. L., Orgogozo, V. Science 323, S. 746–751, 2009

[7] Whoriskey, S. K. et al., Genes Dev. 1, S. 227–237, 1987

[8] Andersson, D. I., Science 282, S. 1133–1135, 1998



ENTWICKLUNG DER CHORDA

Das Rückgrat ist älter als gedacht

von Lars Fischer

Eine Wurmlarve deutet an: Das Rückgrat
könnte schon weit früher als gedacht
aufgetaucht sein – in Form eines Muskels.

Wir Menschen gehören zum Stamm der Chordatiere – benannt nach einem stabförmigen Stützapparat, aus dem sich auch die Wirbelsäule entwickelte, und der für diese Tiere typisch ist. Dachte man bisher. Ein Team vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg allerdings ist anderer Ansicht: Die Forscher um Detlev Arendt kommen zu dem Schluss, dass die Ursprün-

ge der Wirbelsäule evolutionsgeschichtlich viel weiter zurückreichen. Demnach ist die **Chorda** – ein Knorpelstab entlang der Längsachse des Tieres – keine exklusive Erfindung der Chordatiere, sondern andere Tierstämme haben diese Struktur im Lauf ihrer Entwicklung wieder verloren.

Zu ihren Schlüssen kommen die Forscher anhand des Ringwurms *Platynereis*. In dessen Larve fanden sie eine Gruppe von Zellen, in der die gleichen Gene aktiviert sind, die bei Chordatieren dafür zuständig

sind, die Chorda auszubilden – aber der Wurm gehört zu einem ganz anderen Tierstamm. Wie sich herausstellte, bilden die fraglichen Zellen einen Muskel am Rücken des Tieres, dort, wo man bei Chordatieren die Chorda erwarten würde. Aus diesem Befund schließen Arendt und sein Team, dass diese muskuläre Proto-Chorda schon beim letzten gemeinsamen Vorfahr von *Platynereis* und den Chordatieren vorhanden gewesen sein muss. Tatsächlich fanden sie ähnliche Strukturen auch bei anderen Tierstämmen. Bei den Chordatieren habe sich der Muskel dann in den Knorpelstab der Chorda umgewandelt, bei anderen Tierstämmen dagegen verschwand er wieder, so die Forscher.

(Spektrum.de, 12. September 2014)



EMBL / LAURI, A. ET AL.: DEVELOPMENT OF THE ANNELID AXOCHORD: INSIGHTS INTO NOTOCHORD EVOLUTION. IN: SCIENCE 345, S. 1365–1368, 2014

INNENANSICHTEN EINER WURMLARVE
Dreidimensionale Darstellung der *Platynereis*-Larve und ihren Geweben – samt dem zentralen Muskelstrang, der die Forscher auf die Spur der Rückgrat-Evolution brachte.



WIRBELTIEREVOLUTION

Zähne sind wohl älter als Kiefer

von Jan Osterkamp

Irgendwann lernten Wirbeltiere, mit Kiefern und Zähnen kräftig zuzubeißen. Nur was entstand zuerst?

Die meisten Wirbeltiere zeichnen sich nicht nur durch ihre namensgebenden Rückenwirbel, sondern auch durch ihre praktischen, klappbaren Kiefergelenke sowie ihre **ungemein nützlichen Zähne** aus: beides Erfindungen der Evolution, die bei keiner anderen Tiergruppe so vorkommen. Dabei wissen Evolutionsbiologen und Zoologen bis dato allerdings nicht genau, wie, wo, wann und bei wem beide anatomischen Besonderheiten früher einmal zuerst aufgetaucht sind: Eindeutige Fossil Exemplare von gerade noch kiefer- und zahnlosen Vorfahren aus der entscheidenden Übergangszeit sind rar. Nun glauben Forscher, aus einem alten **Panzerfischfossil** etwa Neues über die Entstehungsgeschichte der frühen Wirbeltiermundwerkzeuge herausgelesen zu haben: Zähne, so ihre Schlussfolgerung, haben sich unabhängig vom Kiefer entwickelt, und beide Erfindungen sind dann später sinnvoll kombiniert worden.

Das **ergaben die Synchrotronanalysen** an einem 410 Millionen Jahre alten Exemplar von *Romundina stellina*, dessen Fossil im arktischen Kanada gefunden worden war. Die »Zähne« des Tiers – als Vertreter der längst ausgestorbenen Panzerfische eines der frühesten Wirbeltiere mit Kiefer – ähnelten damals auch

bei ausgewachsenen Exemplaren noch eher der länglichen, zusammenhängenden Leiste, die heute bei vielen modernen Wirbeltieren nur noch in der Embryonalentwicklung zu erkennen ist. Schon bei diesen Urkieferträgern erkennt man aber im Röntgenquerschnitt, dass einzelne Zahnanlagen wie moderne Zähne zweigeteilt sind: Über einer Dentinbasis wölbte sich hartes Zahnschmelzmaterial. Vor allem aber zeigt sich, dass damals typischerweise größere einzelne Zahnleisten der ausgewachsenen Tiere aus vielen kleinen Zähnchen zusammenwuchsen, die aber auch ihrerseits bereits aus Dentin und Zahnschmelz bestanden. Die Fähigkeit, komplexe Minizähnchen zu bilden, gab es demnach wohl schon, bevor es die kiefertragenden Wirbeltiere gab. Das ist überraschend für die Zahnevolutionsforscher, die bisher die Zahnevolution vor allem an den auch sehr alten Haien untersucht hatten, bevor sie nun die noch etwas älteren Panzerfische unter die Lupe nahmen. Auch die Hai-fischhaut trägt ja winzige Zähne und unterstreicht, wie unabhängig Kiefer und Zahn sein können. Diese Unabhängigkeit allerdings hatte man eher für eine spätere Erfindung gehalten.

(Spektrum.de, 24. Juni 2015)

Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT

Quelle des Lebens

MEERE & OZEANE



FÜR NUR
€ 4,99

- > Der lange Weg des Plastikmülls im Meer
- > Stammt das Meersalz aus Kometen?
- > Haiwanderungen auf der Spur

HIER DOWNLOADEN



LANDGANG

Zunge aus Wasser half bei der Eroberung des Festlands

von Lars Fischer

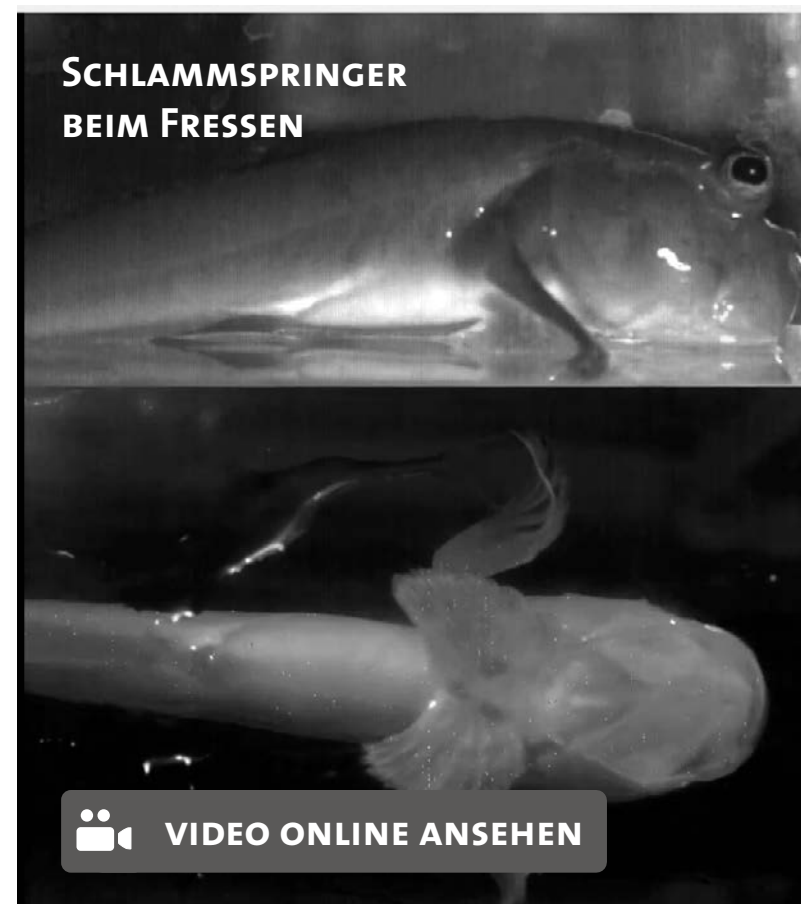
An Land Essen im Mund zu behalten, ist ohne Zunge nicht einfach. Einige Fische behelfen sich mit einem Wassertropfen.

Ein Indiz, wie die ersten Proto-Vierbeiner außerhalb des Wassers fraßen, **entdeckten Krijn Michel von der Universität Antwerpen und seine Kollegen in Untersuchungen an Afrikanischen Schlammpringern (*Periophthalmus barbarus*)**. Mittels Zeitlupen- und Röntgenaufnahmen stellten sie fest, dass der Fisch dazu eine kleine Portion Wasser im Mund behält. Die wenige Zentimeter langen Fische speien das Wasser auf die Nahrung und saugen es anschließend wieder ein. Dabei funktioniert der Wassertropfen als Zungenersatz, der das Futter Richtung Rachen befördert. Fische haben keine den Landwirbeltieren vergleichbare Zunge, da sie im Wasser die Beute einfach einsaugen. Das geht an Land nicht, weshalb es bisher völlig rätselhaft war, wie den ersten Landwirbeltieren die Ernährung im neuen Lebensraum gelang.

Trotz der fehlenden Zunge können einige Fische, neben dem Schlammpringer auch Welse, an Land Nahrung zu sich nehmen. Um zu sehen, wie sie das bewerkstelligen, setzten Michel und seine Kollegen den Fischen ein Stück Garnele vor – dabei war der kurz erscheinende Wassertropfen deut-

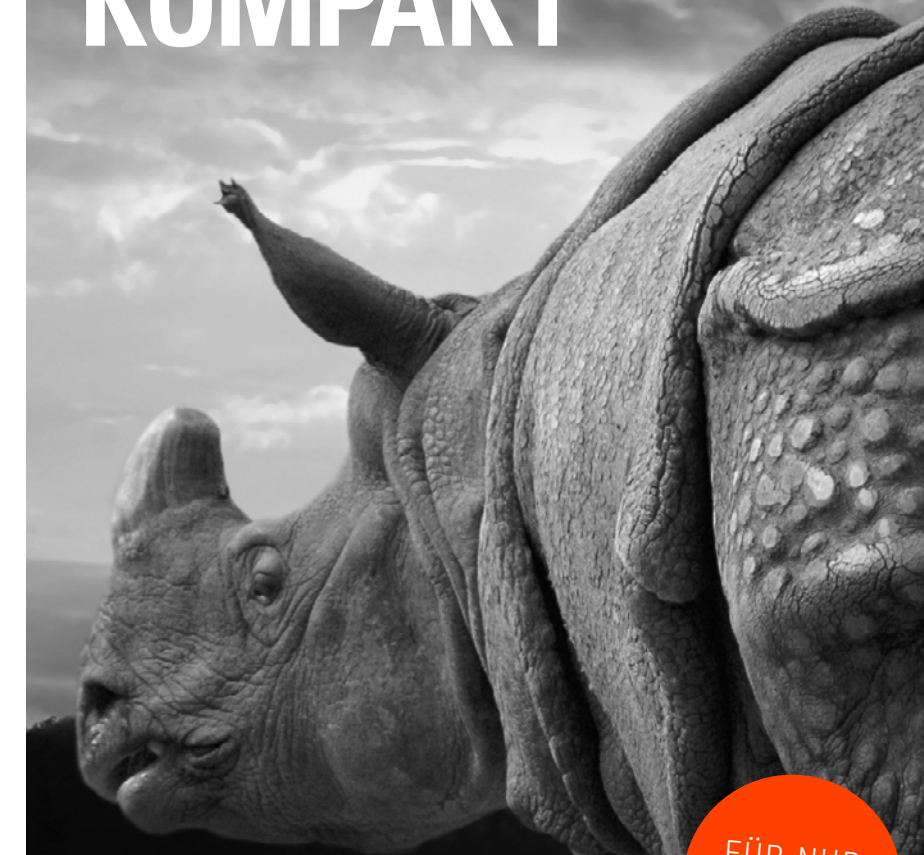
lich sichtbar. Um dessen entscheidende Rolle für den Futtertransport nachzuweisen, nutzten die Forscher einen herzlosen Trick: Sie beschichteten das Futter mit einem **stark wasserabsorbierenden Material**, so dass der Wassertropfen verschwand, bevor der Fisch ihn samt Nahrung wieder einsaugen konnte. Die Technik ähnelt jener von Kaulquappen, so dass die Forscher es für möglich halten, dass auch die ersten Landlebewesen diese Methode verwendeten. <

(Spektrum.de, 18. März 2015)



Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT



FÜR NUR
€ 4,99

BIODIVERSITÄT

Von **Artenvielfalt** und **Artensterben**

Die Jäger der unbekannten Art
Wälder schützen heißt Leben retten
Manchmal kehren sie wieder

HIER DOWNLOADEN



K. T. GRANT

GENETIK

Wie die Darwinfinken zu ihren Schnabelformen kamen

von Daniela Zeibig

Ein Genanalyse offenbart jene Erbgutabschnitte, die die Evolution der Darwinfinken beflügelt haben.

Forscher der Universitäten Princeton und Uppsala ist es gelungen, jene Gene zu identifizieren, die den Darwinfinken ihre berühmten Schnabelformen verleihen. Die gemeinsamen Vorfahren der Vögel begannen etwa vor zwei Millionen Jahren mit der Besiedlung der Galapagosinseln. Seitdem differenzierten sie sich in 15 verschiedene Arten aus, die sich vor allem durch ihre unterschiedlich geformten Schnäbel auszeichnen. Diese ermöglichen es ihnen, sich verschiedene Nahrungsquellen zu Nutze zu machen und so im Lauf der Zeit verschiedene ökologische Nischen zu besetzen – ein Prozess, der bis heute als Musterbeispiel für die Artenbildung im Zuge der Evolution gilt.

Die Wissenschaftler sequenzierten erstmals das Genom von 120 Individuen aus allen 15 Spezies und zwei verwandten Arten und verglichen anschließend die Daten von zwei Spezies mit stumpfen und zwei Spezies mit spitzen Schnäbeln miteinander. Dabei stießen sie auf 15 Genregionen, die sich deutlich voneinander unterscheiden und von denen sechs Gene enthielten, die man bereits in der Vergangenheit mit der Entwicklung des Schädels und des Schnabels in Verbindung gebracht hatte.

Besonders hervor stach dabei das Gen *ALX1*, das offenbar nicht nur die Schnabelform zwischen den verschiedenen Arten beeinflusste, sondern auch die Form der Schnäbel einzelner Tiere innerhalb der Spezies der Mittel-Grundfinken (*Geospiza*

fortis). »Das ist vor allem deshalb eine aufregende Entdeckung, weil wir bereits nachweisen konnten, dass die Schnabelform der Mittel-Grundfinken sich in der Vergangenheit besonders schnell an Umweltveränderungen angepasst hat«, erklärt Studienautorin Rosemary Grant von der Princeton University. Genmutationen, die *ALX1* inaktivieren, gehen beim Menschen oftmals mit schweren Missbildungen im Gesicht einher. Umso interessanter sei es, dass kleine Veränderungen an diesem Gen bei den Darwinfinken offenbar zur Entwicklung der verschiedenen Arten beigetragen haben, so die Forscher. <

(Spektrum.de, 12. Februar 2015)

ARTBILDUNG

Evolution im Zeitraffer

von Roland Knauer

Bei manchen Buntbarschen entstehen in Rekordgeschwindigkeit neue Arten. Forscher untersuchen die Bedingungen dafür – und die beteiligten genetischen Mechanismen.



Die beiden Zitronenbuntbarsche finden offensichtlich Gefallen aneinander. Nichts Ungewöhnliches, sollte man meinen, dass sich ein Männchen und ein Weibchen derselben Art füreinander interessieren. Außerdem sind die in Mittelamerika verbreiteten und bei Aquarianern beliebten Zitronenbuntbarsche für ihren Hang zum Familienleben bekannt: Bei ihnen kümmert sich ein Paar gemeinsam um seine Brut. Auch diese beiden im Xiloá-Kratersee Nicaraguas, Vertreter der Art *Amphilophus xiloensis*, haben schon Nachwuchs, den sie nun sorgsam hüten.

Doch eigentlich geben sich Zitronenbuntbarsche bei der Wahl eines Partners heikel – und zwar was dessen Färbung betrifft. Ihre verschiedenen Spezies werden heute in den so genannten *Amphilophus-citrinellus*-Artenkomplex gestellt. Bei vielen davon tragen die meisten der Artgenossen dunkle Streifen und Flecken auf einem helleren Grund: Sie wirken eher unscheinbar grau-schwarz. Bei einer Reihe dieser Arten verliert allerdings etwa jedes 20. Tier in später Jugend seine schwarzen Pigmente und bekommt dann ein gelbliches bis röt-

lich goldenes Kleid. Und gemäß dem Motto »Gleich und Gleich gesellt sich gern« gründen dann fast nur Fische von ähnlichem Äußeren eine Familie. Die beiden Buntbarsche im Xiloá-Kratersee bilden da eine Ausnahme.

Der Evolutionsbiologe Axel Meyer von der Universität Konstanz beobachtete diese Vorliebe schon als Doktorand an der University of California in Berkeley bei den Fischen in ihrer Heimat. Seitdem lässt ihn der Gedanke nicht mehr los, dass hier vielleicht gerade eine neue Spezies entsteht, bei der alle Erwachsenen goldgelb aussehen werden. Wenn diese These zutrifft – wovon Meyer überzeugt ist –, würden die Forscher hier sozusagen der Evolution direkt, »live«, bei der Artbildung zusehen. Es ist offensichtlich, dass bei diesem Artenkomplex zwei Kräfte eine Rolle spielen: die »natürliche« und die »sexuelle« Selektion. Bei einigen der Arten unterscheiden sich die Fische nicht in der Färbung – alle Tiere bleiben gestreift –, jedoch in den Körperproportionen und Zähnen. An solchen Unterschieden kann die natürliche Auslese angreifen. Treten jedoch zwei Farbmorphen auf, zusammen mit selektiver Partnerwahl, wirkt sexuelle Auslese.

AUF EINEN BLICK

Der Artbildung zusehen

- 1 Neue Evolutionslinien und Arten entstehen auf verschiedene Weise: oft nach geografischer Trennung von Populationen, aber auch davon unabhängig durch neue Anpassungen.
- 2 Bei vielen Buntbarschen – Cichliden – erfolgt die Evolution neuer Arten in rasantem Tempo. Auch heutzutage scheint ihre Artenzahl beständig zu wachsen.
- 3 Diese Buntbarsche benötigen für den Artenzuwachs mitunter nicht einmal geografische Barrieren. Vielmehr reagieren sie teils stark und sehr flexibel auf Umweltgegebenheiten. Oder es entwickeln sich am selben Ort Verhaltensunterschiede zwischen einzelnen Gruppen, die dann Veränderungen im Körperbau nach sich ziehen.



ZITRONENBUNTBARSCH

Dieses Foto zeigt ein Paar von Zitronenbuntbarschen der Art *Amphilophus xiloensis* im Xiloá-Kratersee in Nicaragua. Normalerweise verpaaren sich diese Fische nur mit gleich gefärbten Artgenossen. Doch hier haben ein dunkel gestreiftes Männchen und ein goldfarbenedes Weibchen zusammengefunden und hüten ihre Brut nun gemeinsam.

len sie mit rund 3000 Spezies die vielleicht größte zoologische Familie dar. Gut die Hälfte der Wirbeltierarten sind Fische, und von denen gehören allein etwa acht Prozent zu den Cichliden. Alle Säugetiere zusammen bringen es dagegen auf nicht einmal 6000 Spezies. Als deren artenreichste Familie gelten mit rund 750 Arten die Muriden, die »Langschwanzmäuse« der Alten Welt, zu denen etwa Hausmaus oder Wanderratte zählen.

Für Evolutionsstudien sind Buntbarsche auch wegen ihrer schnellen Generationsfolge recht gut geeignet. Viele von ihnen können sich schon im Alter von wenigen Monaten fortpflanzen. Zitronenbuntbarsche etwa bringen mindestens jedes Jahr eine neue Generation hervor.

Die Idee, dass in den Kraterseen Nicaraguas gerade neue Arten entstehen, ist nicht völlig überraschend. Schließlich haben die Buntbarsche - Cichliden – in lateinamerikanischen und afrikanischen Seen in den letzten Jahrtausenden und sogar Jahrhunderten häufig neue Lebensräume erobert und dabei eine große Anzahl neuer Spezies hervorgebracht. Diese Fische können sich in Körperbau und Verhalten sehr schnell an neue Umweltbedingungen anpassen.

So zeigte Meyers Team, dass in Nicaragua zumindest in zwei kleinen, 2000 Jahre alten Kraterseen Arten leben, die nur jeweils in einem See vorkommen. Auch von Afrika ist bekannt, ebenfalls von Studien aus Meyers Labor, dass Buntbarsche extrem schnell neue Arten bilden können – wobei sich die Evolution in den verschiedenen Seen Ostafrikas in auffälliger Weise wiederholt.

Buntbarsche sind ein evolutionäres Erfolgsmodell. Unter allen Wirbeltieren stel-

MIT FRDL. GEN. VON AD KONINGS (WWW.CICHLIDPRESS.COM)

Deshalb lieferte das Vierteljahrhundert Buntbarschforschung, auf das Meyer zurückblicken kann, ihm tiefe Einblicke in aktuelle Evolutionsprozesse.

Zu den spannendsten – und lange strittigen – Fragen rund um die Entstehung von Arten gehört das alte Rätsel, unter welchen geografischen Bedingungen sich neue Spezies überhaupt bilden. In vielen Fällen geschah das offensichtlich dann, wenn Populationen räumlich voneinander isoliert wurden und so keine Gene mehr ausgetauscht werden konnten. Nach neueren Erkenntnissen, gerade auch von den Buntbarschen der Kraterseen Nicaraguas, ist eine geografische Trennung dafür aber keineswegs immer notwendig.

Seit einigen Jahrzehnten betrachten Biologen den Victoriasee in Ostafrika als einen besonders aufschlussreichen Ort, um Gesetzmäßigkeiten bei der Auffächerung und Neubildung von Arten zu untersuchen. Mit 68 800 Quadratkilometern – etwa die Fläche Bayerns – ist dies der zweitgrößte Süßwassersee der Erde (nach dem Oberen See in Nordamerika). Allerdings ist der Victoriasee nicht sehr tief. Im Durchschnitt beträgt die Wassertiefe heute etwa 40, maximal gerade einmal 84 Meter.

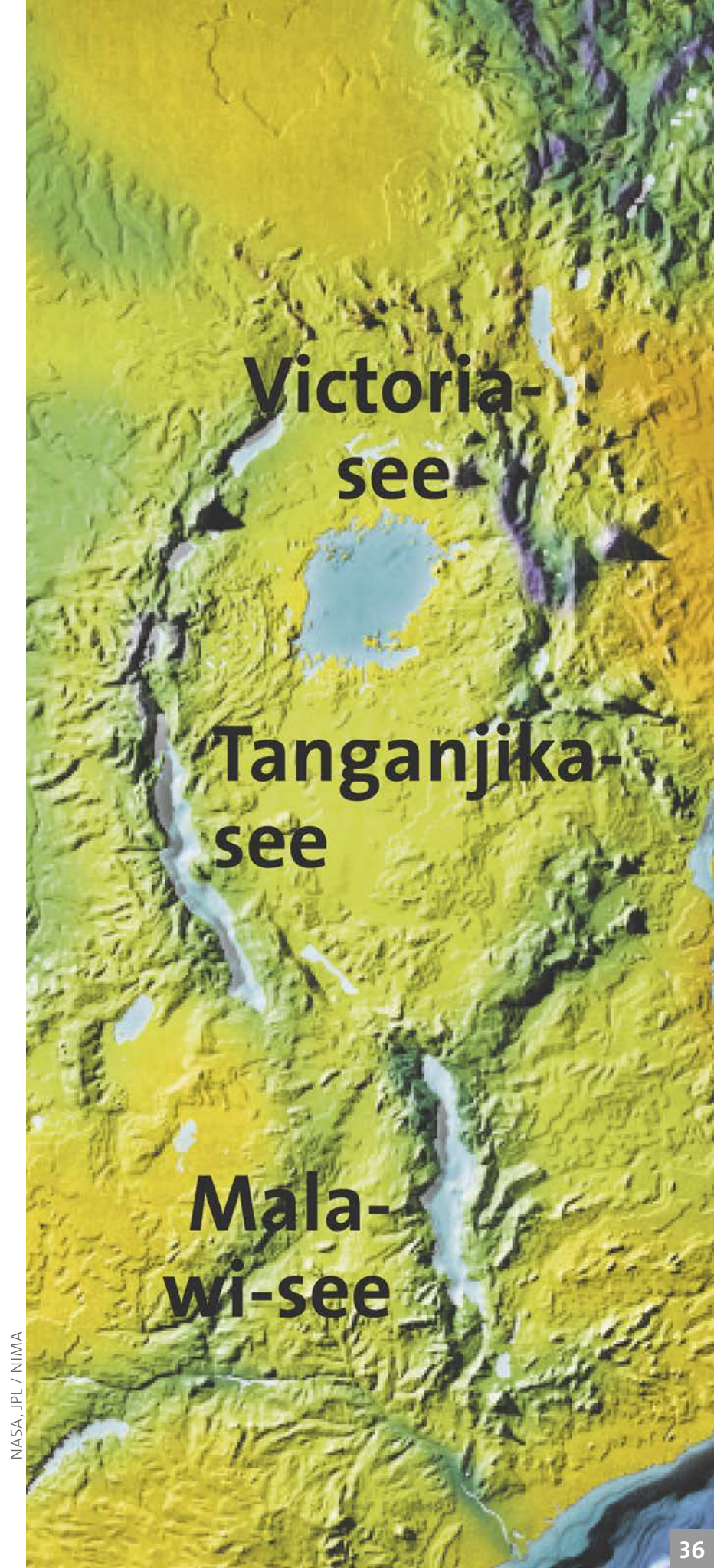
Klimaänderungen in früheren Zeiten hatten deswegen für seine Bewohner manchmal dramatische Folgen. Kaltzeiten auf der Erde bedeuten weniger Feuchtigkeit in der Luft und dadurch weniger Niederschlag. Diese Phasen bekam auch der Victoriasee zu spüren. Insgesamt dreimal scheint er in geologisch jüngerer Vergangenheit praktisch trockengefallen zu sein, und zurück blieben wohl nur Schlammflächen und höchstens ein paar wesentlich kleinere Seen, deren hohen Salzgehalt Süßwasserfische nicht aushielten. Das letzte Mal dürfte sich solch eine Katastrophe vor rund 17 300 Jahren ereignet haben.

Geschwindigkeitsrekorde

Erst vor 14 700 Jahren füllte sich der Victoriasee langsam wieder. Die Vorfahren seiner heute rund 500 Buntbarscharten dürften sich demnach frühestens damals dort neu angesiedelt haben. Anscheinend schafften das überhaupt nur ein oder zwei Arten. Denn wie Meyer und seine Kollegen

SEEN IN OSTAFRIKA

In den großen Seen Ostafrikas leben viele hundert Buntbarscharten.



schon in den 1990er Jahren mit Erbgutanalysen nachwiesen, stammen alle heutigen Cichliden des Sees offenbar von derselben Linie aus jener Zeit ab. Grob gerechnet wäre seitdem durchschnittlich etwa alle 30 Jahre eine neue Art hinzugekommen.

»Das ist Evolution im Zeitraffer«, kommentiert Axel Meyer. Eine so rasante Ar-



MAULBRÜTER

Die meisten Buntbarscharten sind Maulbrüter, und die Weibchen übernehmen die Brutpflege: hier ein Weibchen der Art *Nimbochromis livingstonii* im Malawisee.

tentstehung scheint allerdings selbst bei Cichliden etwas Besonderes darzustellen, denn generell gilt sie für die Buntbarsche der großen ostafrikanischen Seen nicht. Beispielsweise scheinen sich die Fische im Tanganjikasee deutlich mehr Zeit zu nehmen. Dieser bis zu 1470 Meter tiefe See ist bereits zehn Millionen Jahre alt und wohl kaum jemals trockengefallen. Trotz seines hohen Alters leben in ihm »nur« 250 Cichlidenarten, halb so viele wie im sehr viel jüngeren Victoriasee. Man sollte meinen, dass ein 673 Kilometer langes und bis zu 72 Kilometer breites Gewässer reichlich Platz und diverse Habitate für verschiedenste Arten bereithalten würde.

Wieder anders, ebenfalls verblüffend, stellt sich der Malawisee dar. Mit rund 570 Kilometer Länge, 75 Kilometer Breite und bis zu 706 Meter Tiefe steht er zwischen dem Victoria- und dem Tanganjikasee, ebenso mit seinem Alter von unter vier Millionen Jahren. Dabei beherbergt er deutlich mehr Cichlidenspezies als der Victoriasee – nach derzeitigen Schätzungen zwischen 800 und 1000.

Die Geschichte der Besiedlung dieser drei riesigen Seen durch Buntbarsche konnten Meyer und seine Mitarbeiter mo-

lekulargenetisch zurückverfolgen. Denn das Alter einer Linie spiegelt sich darin, wie viele Mutationen sich im Erbgut angehäuft haben. Tatsächlich findet sich für den Tanganjikasee, passend zu seinem Alter, unter seinen Buntbarscharten die größte genetische Variation und für den Victoriasee die deutlich geringste. Entsprechend weit liegt die Besiedlung des Tanganjikasees nachweislich zurück. Die Erbgutvergleiche lassen zudem erkennen, dass seine Cichliden von Flussbuntbarschen aus dem Kongobecken in Westafrika abstammen, wo die ältesten Buntbarsche des afrikanischen Kontinents leben. Vom Tanganjikasee aus gelangten Buntbarsche über temporäre Flussverbindungen in den Malawisee, später erreichten sie auf ähnliche Weise auch den Victoriasee.

Wie sich die unterschiedlichen Artenzahlen in diesen Seen erklären, weiß man noch nicht. Eine Idee ist, dass die Anzahl der Spezies nach einer expansiven Phase nachträglich wieder zurückgeht, etwa auf Grund von ökologischer Konkurrenz, während nun die morphologischen Unterschiede größer werden. Die Cichliden des Tanganjikasees lassen sich wesentlich leichter voneinander unterscheiden als die

Arten im Victoria- oder die im Malawisee.

Die zahlreichen Cichlidenarten in den afrikanischen Seen erklären Biologen unter anderem damit, dass diese Fische besondere anatomische Voraussetzungen etwa für die Kieferbildung und Bezahnung mitbrachten. Damit konnten sie sich leichter auf neue, spezialisierte Lebensweisen umstellen als Angehörige anderer Fischfamilien. Es ist auffällig, dass nur die Buntbarsche dermaßen viele Arten hervorgebracht haben, obwohl in diesen Seen auch andere Fische leben. Zugleich bietet die dortige Vielfalt an Lebensräumen ihnen offenbar gute Voraussetzungen für ein Aufspalten in neue Arten. In den Seen gibt es wesentlich mehr Cichlidenspezies als in den Flüssen. Felsige und sandige Bereiche, steile und ebene Abschnitte, tiefe und flache Zonen, Felsküsten und Ufer mit Stränden wechseln einander vielfältig ab. Oft wirkt der eigene Lebensraum für die Bewohner wie eine Insel, die sie nicht verlassen. Ein völlig anders gestaltetes angrenzendes Habitat kann dann eine Verbreitungsbarriere darstellen. Dadurch entstanden lokal immer wieder neue und andere Arten mit speziellen Lebensgewohnheiten. Außerdem aber bildeten sich in ei-

nander ähnlichen, jedoch räumlich getrennten Habitaten erstaunlich oft Fische mit gleichen Anpassungen heraus – auch das für die Forscher ein aufschlussreiches Phänomen.

Die erste Buntbarschart, die im Victoria-see nach dem letzten Austrocknen auftauchte, gehörte zu den Haplochrominen, einer besonders erfolgreichen Linie von Cichliden, zu der auch fast alle Arten des Malawisees zählen. Allein von ihnen gibt es über 1800 Arten. Sie alle sind »Maulbrüter«. Und zwar hüten bei ihnen die Mütter die Brut. Ein Weibchen legt seine noch unbefruchteten Eier im Territorium eines balzenden Männchens – nur um sie gleich darauf ins Maul zu nehmen, somit in sichere Obhut. Der Revierinhaber aber präsentiert jetzt unverzüglich seine verlockende Afterflosse, auf der kleine, runde, schwarz umrandete orange Flecken prangen. Diese leuchtenden »Eiflecken« entstehen testosterongesteuert durch Ausschalten bestimmter Pigmentgene, wie Meyer und sein früherer Mitarbeiter Walter Salzburger, der heute an der Universität Basel forscht, herausfanden. Optisch ähneln sie verblüffend den wirklichen Eiern, und das Weibchen scheint sie tatsächlich dafür zu



MIT FRDL. GEN. VON HENRIK KUSCHE

EVOLUTIONSFORSCHER AXEL MEYER

Der Evolutionsforscher Axel Meyer inspiziert Buntbarsche, die er gerade im Tanganjikasee gefangen hat.

halten, denn es schnappt danach, als wollte es schnell die »vergessenen« Eier aufsaugen, und stößt dabei gegen die Eiattrappen. In diesem Moment gibt das Männchen Samen ab, den das Weibchen aufsaugt. So werden die Eier im Maul der Mutter befruchtet und können sich dort relativ geschützt entwickeln, denn unter den Buntbarschen gibt es auch spezielle Eierdiebe.

Die Mundhöhle der Mutter ist noch für die Jungfische in einem Gewässer voller Fressfeinde ein ziemlich sicherer Ort. Nach dem Schlüpfen dürfen sie zwar schon bald ins Wasser hinaus – aber immer, wenn die Mutter eine Gefahr spürt, beordert sie ihren Nachwuchs mit einer bestimmten Körperbewegung wieder ins Maul zurück. Es gibt allerdings auch Kinderfresserbuntbarsche, so genannte pädophage Arten, die es auf diesen nahrhaften Mundinhalt abgesehen haben. Manche saugen am Maul des Mutterfisches und versuchen so, Eier oder Jungfische herauszuholen. Andere rammen den Kopf der Mutter von unten, quasi um sie zu zwingen, ihre Brut auszuspucken.

Vorteile eines schiefen Mauls

In den afrikanischen Seen gibt es noch weitere verblüffende Ernährungsweisen. Man-

che Buntbarsche »grasen« zum Beispiel Schuppen ab: Sie nähern sich dem Opfer möglichst unbemerkt von hinten an, um dann von dessen Flanke rasch einige Schuppen abzuraspeln. In allen drei genannten Seen gibt es hierauf spezialisierte Arten – allein im Tanganjikasee sechs. Der Clou dabei: Einige dieser Fische haben einen leicht schiefen Kopf, denn mit einem etwas seitlich stehenden Maul lassen sich Schuppen leichter und rascher klauen. Bei etwa der Hälfte der Artgenossen ist der Mund etwas nach rechts verschoben, bei der anderen Hälfte nach links. Die gleiche Verteilung könnte eine Anpassung sein, die verhindert, dass angegriffene Fische auf eine Seite besonders Acht geben. Da die Schuppenfresserarten der verschiedenen Seen nicht auseinander hervorgegangen sein können, muss diese spezialisierte Lebensweise mehrmals unabhängig entstanden sein. Solche Schuppendiebe wirken jedoch im Vergleich zu einem Cichliden des Malawisees noch recht harmlos: Er lebt unter anderem davon, anderen Fischen die Augen auszapfen.

In den ostafrikanischen Seen untersuchen Biologen, wie sich die Buntbarsche das große Angebot an Lebensräumen

durch vielfältige Anpassungen zu Nutzen gemacht haben und sich an vielen Stellen sogar das gleiche Habitat ökologisch mit mehreren Spezies teilen. Da gibt es etwa Spezialisten für Sand- und andere für Felsenküsten. Manche Arten bevorzugen tiefe Zonen, andere flaches Wasser. In den felsigen Bereichen weiden bestimmte Buntbarsche Algen ab, andere klaben mit langen Zähnen Insektenlarven aus Spalten. Ein Felsenriff kommt für seine Bewohner oft einer Insel gleich, weil eine breite Sandfläche es vom nächsten Riff trennt. Beim Versuch, diese Strecke zu überqueren, würden ans Leben im Riff angepasste Buntbarsche leicht Opfer von Raubfischen. Daher verlassen solche Spezialisten ihr Gebiet normalerweise nicht. Weil somit jede »Insel« ihre eigene – lokale – Evolution erlaubt, konnten in diesen Seen die riesigen Artenzahlen aufkommen. Im Vergleich hiermit bringen es die Fische der Süßgewässer und Meere Europas nur auf insgesamt etwas über 200 Spezies.

Biologen bezeichnen es als »allopatrische Artbildung«, wenn sich Populationen derselben Spezies in voneinander getrennten Gebieten eigenständig weiterentwickeln und schließlich genetisch nicht mehr



SEEN IN NICARAGUA

In Nicaragua haben sich in einer Reihe von Vulkankratern Seen gebildet; nur einige sind in der Karte aufgeführt. Darin entwickelten sich isolierte Fischpopulationen. Besonders die Buntbarsche – die erst durch Wirbelstürme dorthin gelangten – bieten Evolutionsforschern Einblicke in Prozesse der Artbildung.

zusammenpassen. In Ostafrika betrifft dies nicht nur ähnliche Lebensräume im selben See, sondern natürlich genauso die verschiedenen Seen. Zwischen ihnen liegen weite Distanzen, und es dürfte höchst selten vorkommen, dass Fische von einem in einen anderen gelangen. So entstanden im Malawi- und im Victoriasee jeweils eigene Kinderfresser oder Schuppendiebe. Aber auch für die Kraterseen Nicaraguas, also auf einer viel kleineren geografischen Dimension, zeigte Meyer, dass in den einzelnen Seen ähnliche Arten unabhängig voneinander entstanden. Sein Team sucht nun nach der genetischen Basis solcher »parallelen« Evolution. Es möchte herausfinden, ob ähnliche Anpassungen auf den gleichen Mutationen beruhen oder auf verschiedenen genetischen Mechanismen.

Schwerer als eine allopatrische Artbildung lässt sich erklären, weshalb zum Beispiel im selben Felsenriff, also ohne eine räumliche Trennung, unterschiedlich spezialisierte Arten nebeneinander entstehen konnten, die sehr nah miteinander verwandt sind. Wieso und auf welche Weise entwickeln sich neue Linien ohne äußeren Zwang? Diesen Vorgang bezeichnen die Forscher als »sympatrische Artbildung«.

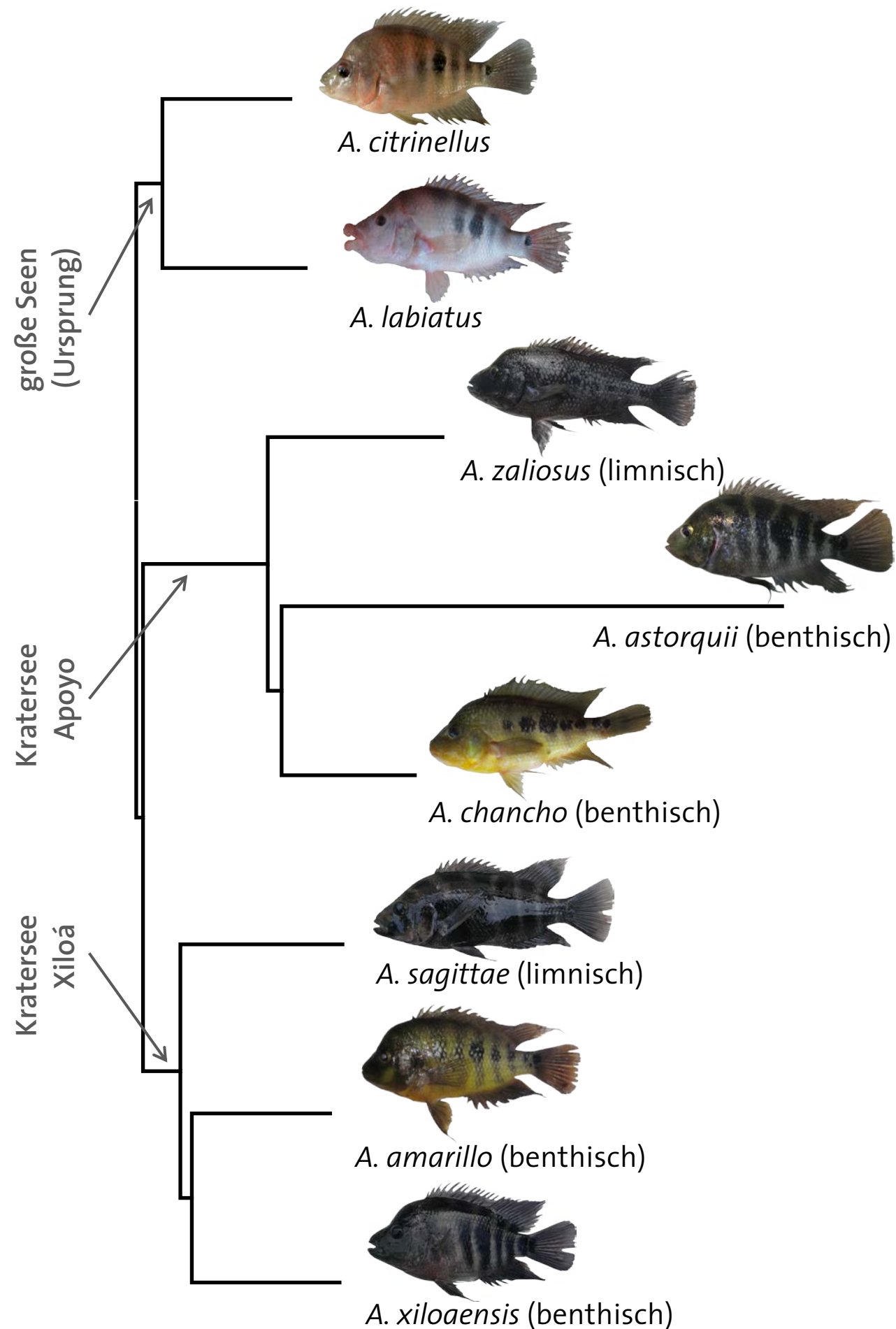
Studien dazu sind in den riesigen afrikanischen Seen sehr aufwändig, und die Ergebnisse werden bei dort rund 1800 Buntbarscharten bald unübersichtlich. Ohnehin bevorzugen Naturwissenschaftler leichter überschaubare Systeme, um grundlegende Mechanismen und Einflussfaktoren aufzudecken.

Hier kommen die Kraterseen in Mittelamerika den Wünschen der Evolutionsforscher entgegen. Sie stellen sozusagen ein natürliches Experiment dar: Von einer Ausgangspopulation wurden sie mehrfach und unabhängig besiedelt, aber mit ähnlichen evolutionären Ergebnissen. Meyer selbst hat dort schon seit Mitte der 1980er Jahre Studien durchgeführt. Die Kraterseen Nicaraguas liegen in einer Reihe erloschener oder ruhender Vulkane. Weil sie nicht durch Wasserwege verbunden sind, konnten Fische sie nicht von allein erreichen. Dennoch leben darin Cichliden. Wie gelangten sie dorthin? Und wann?

Eine der seltenen Gelegenheiten für solch eine Besiedlung bieten gewaltige tropische Wirbelstürme, die mit großen Wassermengen manchmal Fische mit in die Luft reißen. Im indischen Bundesstaat Kerala etwa fielen 2006 bei so einem Wetter-

ereignis tatsächlich Fische vom Himmel. Nicaragua wird häufig von schweren Hurrikanen heimgesucht, und es kommt vor, dass ein Wirbelsturm aus dem Managua- oder dem Nicaraguasee Fische in die Luft saugt. Auch in diesen beiden 1000 und über 8000 Quadratkilometer großen Seen leben Buntbarsche. Im Lauf der Jahrtausende scheinen Wirbelstürme tatsächlich hin und wieder Cichliden und andere Fische in die nahe gelegenen Kraterseen verfrachtet zu haben. Genetische Untersuchungen der Konstanzer Forscher lassen vermuten, dass alle Fische eines Kratersees jeweils etwa zur selben Zeit dorthin gelangten.

Als weitere Transporteure von Buntbarschen kommen große Fische fressende Vögel wie Pelikane, Reiher oder Seeadler in Betracht. Denn mitunter lassen diese ihr Opfer wieder fallen oder spucken es fast unversehrt wieder aus. Für eine bleibende Besiedlung müsste der Zufall allerdings Männchen und Weibchen derselben Buntbarschart in denselben Kratersee befördert haben. Weil die verschiedenen Gelegenheiten sicherlich sehr selten eintraten, wundert es nicht, dass die nah verwandten Buntbarsche eines Kratersees praktisch



STAMMBAUM

In Seen Nicaraguas entstanden aus gedrunenen Grundfischen (benthisch) mehrmals ähnliche Buntbarscharten: schlanke Fische des freien Wassers (limnisch) sowie Arten mit vorgestülpten dicken Lippen. Die Darstellung zeigt einen von den Konstanzer Forschern ermittelten genetischen Stammbaum zu mehreren *Amphipomus*-Arten aus zwei Kraterseen und den großen, alten Seen ihrer ursprünglichen Herkunft.

immer von einer einzigen Ursprungsart aus einem der beiden großen Seen abstammen, wie Meyer und seine Mitarbeiter genetisch nachwiesen.

Neue Chancen in vulkanischen Seen

Früher hielten Biologen und Aquarianer manche Cichliden in den Seen Nicaraguas für eine einzige Art – die durch eine Vielzahl von Erscheinungsformen auffiel. Die einzelnen Formen sahen sie als Varianten des Zitronenbuntbarsches an. Inzwischen stellte sich aber heraus, dass es sich genau genommen um eine so genannte adaptive Radiation nah miteinander verwandter Arten von Zitronenbuntbarschen handelt. In der englischen Fachliteratur heißen diese Fische Midas-Cichliden – nach dem sagenhaften phrygischen König, der alles, was er berührte, in Gold verwandelte.

Die Neuankömmlinge in einem Vulkansee suchten ihre Nahrung vermutlich noch zwischen den Steinen und dem Geröll am Grund. Denn so machen es die Buntbarsche in den großen und alten Ursprungsseen, dem Nicaragua- und dem Managua-see. Diese sind einige hunderttausend Jahre alt, ihr Wasser ist trüb, und die dortigen Cichliden besitzen eine an diesen Lebens-

raum angepasste eher kompakte Körperform mit hohem Rücken, was in der stark strukturierten Umwelt wendigeres Schwimmen erlaubt. Anders als in diesen großen Seen ist das Wasser in den viel jüngeren Kraterseen normalerweise glasklar.

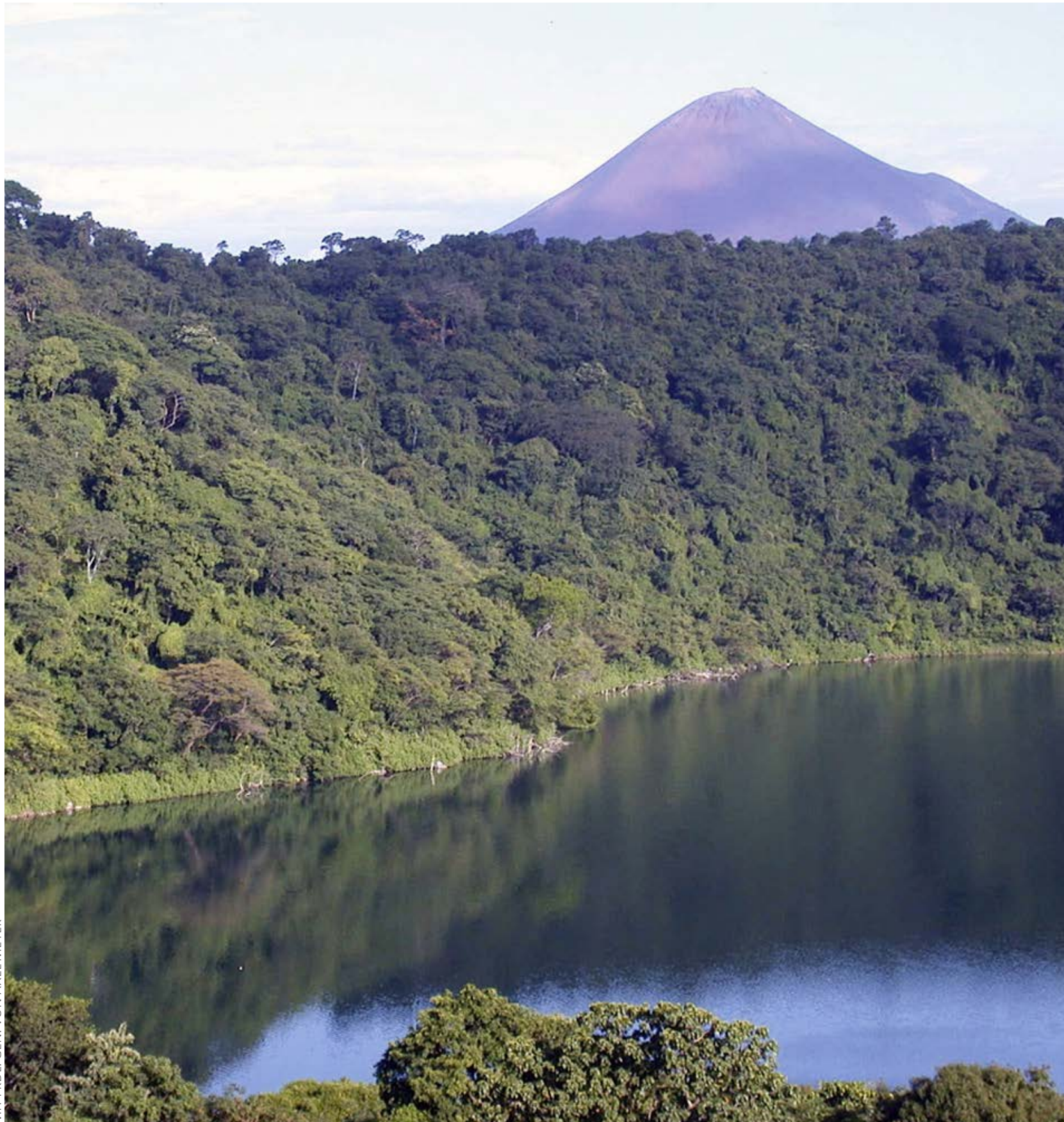
Man kann sich für die Seen in Vulkanen nun folgende Szenerie vorstellen: Wahrscheinlich wagten sich bald einige der neu angekommenen, noch leicht gedrunghenen Buntbarsche ins freie Wasser hinaus und begannen da zu jagen. Für pfeilschnelles Schwimmen ist allerdings ein schlanker Körper günstiger. Dort behaupteten sich also solche Fische besser, die etwas stromlinienförmiger gebaut waren. Die »Freischwimmer« begegneten ihren Paarungspartnern wohl eher im offenen Wasser, und wahrscheinlich waren beide bereits etwas schlanker gebaut als Artgenossen, die lieber zwischen den Steinen blieben und ihrerseits gedrungene Partner schätzten. Die Nachkommen der schlankeren Fische erbten die elegantere Körperform, und über Generationen entstand neben der alten Spezies am Seerand eine neue Buntbarschart schneller Jäger im offenen Wasser.

In diesem Beispiel sorgte also nicht eine unüberwindliche physische Grenze für die

getrennte Entwicklung. Vielmehr lösten offensichtlich eine im Ursprungssee nicht vorhandene, unbesetzte ökologische Nische das veränderte Verhalten der Fische und die körperlichen Anpassungen das Entstehen einer neuen Art aus: Beide Gruppen kamen nach einiger Zeit einfach nicht mehr miteinander in Berührung, und ihr Erbgut entwickelte sich auseinander.

Axel Meyer und seine Kollegen wiesen eine solche sympatrische Artbildung bei mehreren Buntbarscharten der Kraterseen molekularbiologisch nach: Dort bestehen tatsächlich die unsichtbaren Grenzen, an denen sich das Erbgut verschiedener Gruppen auseinanderentwickelt. Solche Barrieren beruhen somit auf dem Verhalten und den Lebensweisen der jeweiligen Gruppen, die sich schließlich zu getrennten Arten entwickeln.

Unter anderem ermittelten die Forscher für Cichliden aus dem Nicaragua- und dem Managuasee sowie aus den beiden Kraterseen Apoyo und Xiloá jeweils die »genetischen Fingerabdrücke«. Darin sehen sie dann zwischen den einzelnen Populationen und Fischformen winzige Abweichungen im Erbmateriale. Die ermittelten Veränderungen zeichnen die Geschichte der



Buntbarsche beider Kraterseen nach: Die heute dort schwimmenden *Amphilophus*-Arten stammen jeweils von Grundfischen aus einem der großen Seen ab, gelangten aber unabhängig voneinander und zu verschiedenen Zeiten in den neuen Lebensraum. Die anschließende Evolution verlief nach diesen Analysen in beiden Kraterseen verblüffend ähnlich, obwohl zwischen ihnen kein genetischer Austausch stattfand. Zuerst entstanden neben der ursprünglichen, am Grund lebenden, kompakten Art jeweils die schlanken Jäger des offenen Wassers. Später spalteten sich in beiden Seen auch die Grundfische selbst nochmals in zwei unterschiedliche Spezies, die zwischen den Steinen andere ökologische Nischen nutzen. Sie knacken Schneckengehäuse mit verschieden stabilen Zähnen. Das Erbgut der *Amphilophus*-Arten im Xiloásee ist deutlich weniger differenziert als im Apoyosee. Der Befund passt zum Alter der beiden Kraterseen. Während der Xiloásee vor höchstens 6100 Jahren

KRATERSEE ASOSOSCA LEÓN

Zu Nicaraguas eindrucksvollen Kraterseen zählt auch der See Asososca León.

entstand, könnte der Apoyosee an die 22 000 Jahre alt sein, wie Steffen Kutterolf vom Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel und seine Kollegen ermittelten. Entsprechend länger konnten sich dort in den einzelnen Fischlinien Mutationen anhäufen. Im Apoyosee entstanden denn auch mittlerweile sechs Buntbarscharten der Gattung *Amphilophus*, im Xiloásee dagegen in der kürzeren Zeit immerhin vier. Neue Arten bilden sich bei diesen Cichliden mitunter sogar noch wesentlich schneller. Auch im Apoyequelkrater entstand ein See – der nach geologischen Analysen allenfalls seit 2000 Jahren existiert. Dieser Vulkan war aber vor etwa 120 bis 180 Jahren erneut aktiv. »Damals muss alles eventuell vorhandene Leben im See gekocht haben«, deutet Meyer die Befunde seiner Kollegen von der Geologie.

Zusammen mit anderen Forschern hat er deswegen auch diesen See aufgesucht, der nur nach einem langen, anstrengenden Abstieg erreichbar ist. Sie wollten wissen, ob heute überhaupt wieder Fische darin leben. Und tatsächlich fanden sie Buntbarsche, und zwar wieder eine Art aus der Verwandtschaft der Zitronenbuntbarsche. Vor allem aber treten sie in zwei verschie-

denen Formen auf. Einige haben dicke, wulstige Lippen, während andere eher schmallippig sind. Der Hintergrund: In den Felsspalten der steilen Kraterseewände verstecken sich gern Krabben. Dort kommen die normalen, schmallippigen Buntbarsche mit ihren eher breiten Köpfen kaum hinein. In höchstens 100 Generationen muss sich in diesem Kratersee also eine Form mit dicken Lippen und lang gestrecktem Kopf entwickelt haben, die sich von dem Getier in den engen Spalten ernähren kann.

Auch in anderen Kraterseen Nicaraguas haben sich Cichliden aus dem Verwandtschaftskreis der Zitronenbuntbarsche an diese Weise des Fressens angepasst – und offenbar entwickelten sie ihre dicken Lippen jeweils unabhängig voneinander. Selbst im Nicaragua- und im Managuasee lebt eine dicklippige Art. Da diese Evolution im Apoyequesee unglaublich schnell verlaufen sein muss, suchten die Forscher nach den Genen, welche die Veränderung der Lippen steuern.

Sie holten dazu dick- und schmallippige Fische aus den beiden alten, großen Seen, aus dem sehr jungen Apoyequesee und aus einem weiteren Kratersee namens Masaya,

dessen Alter Steffen Kutterolf auf unter 6000 Jahre bestimmte. Tereza Manousaki, Doktorandin an der Universität Konstanz, und ihre Kollegen maßen bei den Tieren unter anderem die Rückenhöhe, den Ansatz der Schwanzflosse und die Form der Kiefer. Aus den Lippenzellen isolierten sie dann die so genannten mRNAs der dort aktiven Proteine – also die Genabschriften, die als Vorlage für Proteine dienen. Ein Vergleich der RNA-Sequenzen zeigte: Bei den dicklippigen Fischen aller vier Seen waren stets die gleichen sechs Gene weniger aktiv als bei ihren schmallippigen Verwandten.

Ein »Angelina-Jolie-Projekt«

Die Funktionen von fünf jener Gene sind bereits von anderen Wirbeltieren bekannt. Zwei von ihnen sind für Wachstum und Regeneration von Nervenzellen wichtig. Diese Gene könnten das Wachsen der Nerven für Geschmacksknospen hemmen, mit denen die Fische ihre Beute aufspüren. Sind die Gene weniger aktiv, dürften diese Nervenzellen also besser wachsen. Zwei der anderen Gene sind beteiligt, wenn Muskeln und Knorpel entstehen. Das fünfte Gen spielt für die Immunabwehr von Erregern eine Rolle. Ob die sechs Gene wirklich an

der Evolution dicker Lippen beteiligt sind, könnten Eingriffe ins Genom erweisen. Man müsste diese Erbanlagen beispielsweise in Eiern von Fischen mit schmalen Lippen ausschalten oder ihre Aktivität bremsen. Würden dann anstatt schmallippiger Buntbarsche dicklippige schlüpfen, wäre ein Zusammenhang erwiesen. Transgene Midas-Buntbarsche zu erzeugen, gelang gerade dem Konstanzer Mitarbeiter Claudius Kratochwil. Zudem vergleichen Gonzalo Machado-Schiaffino und Lukas Baumgarten von Meyers Arbeitsgruppe die Genome von dick- und dünnlippigen Buntbarschen aus Nicaragua und Afrika, um zu sehen, ob für die unterschiedliche Lippenbildung die gleichen Gene verantwortlich sind. Sie nennen es das »Angelina-Jolie-Projekt«.

Beobachten die Forscher Paarungen der in Nicaragua untersuchten Zitronenbuntbarsche, sehen sie fast nie »Mischehen« zwischen verschieden gefärbten Artgenossen. Sowohl in den Kraterseen wie auch in Aquarien paaren sich normalerweise schwarz-weiße nur mit ebenso gemusterten dunklen Fischen, während goldgelbe Buntbarsche ähnlich wie sie selbst gefärbte helle Partner bevorzugen. Entstehen

hier aus einer gerade zwei neue Arten? Frederico Henning von Meyers Gruppe glaubt einen Genabschnitt gefunden zu haben, der sowohl für die Farbunterschiede als auch für die Paarungsentscheidung verantwortlich ist.

Diesmal stießen die Forscher gleich auf 46 Gene, die bei den goldfarbenen Exemplaren anders aktiv sind als bei den dunkel gestreiften. Wie man es erwarten konnte, spielen einige dieser Erbinformationen eine Rolle in den Pigmentzellen der Haut. Sie sind bei den hellen Fischen viel weniger aktiv. Andere Gene sind Forschern bereits im Zusammenhang mit Hautkrankheiten bei Menschen aufgefallen. Sie sind für Entzündungsprozesse wichtig. Eine von den abweichenden Erbeigenschaften sticht aber bei den gelben Fischen besonders heraus: Dieses Gen ist sowohl mit ihrer Farbe als auch mit ihrem Sexualverhalten verknüpft.

Wie groß die Chancen sind, dass bald eine eigene goldfarbige Art entsteht – oder sogar mehrere –, lässt sich schwer abschätzen. Die hell leuchtenden Fische können sich vor Fressfeinden nicht so gut verbergen und werden deswegen leicht Opfer von Vögeln und größeren Raubfischen, je-

denfalls solange sie jung sind – so dachten die Forscher zumindest. Experimente mit verschieden gefärbten Wachsmodellen in den Kraterseen ergaben allerdings, dass Vögel die dunklen Attrappen häufiger fingen. Hingegen attackierten Fische fressende Fische, auch Cichliden, die gelben Modelle umso öfter, je trüber das Wasser war. Trotzdem überleben in den verschiedenen Seen Nicaraguas stets genügend von den hellen Buntbarschen und pflanzen sich fort. Es besteht also Hoffnung auf eine goldene Zukunft. <

(Spektrum der Wissenschaft, 4/2014)

Henning, F. et al.: Transcriptomics of Morphological Color Change in Polychromatic Midas Cichlids.

In: BMC Genomics 14, S. 171-183, 2013

Kautt, A. F. et al.: Genomic Signatures of Divergent Selection and Speciation Patterns in a »Natural Experiment«, the Young Parallel Radiations of Nicaraguan Crater Lake Cichlid Fishes.

In: Molecular Ecology 21, S. 4770-4786, 2012

Manousaki, T. et al.: Parsing Parallel Evolution: Ecological Divergence and Differential Gene Expression in the Adaptive Radiations of Thick-Lipped Midas Cichlid Fishes from Nicaragua.

In: Molecular Ecology 22, S. 650-669, 2013



ROTKEHLANOLIS UND BAHAMAANOLIS
Ausgesetzt auf einer Insel: Heimische Art (rechts) und Eindringling (oben) müssen sich miteinander arrangieren.



GLIEDMASSEN

Blitz-Evolution durch Konkurrenz- druck

von Judith Merkelt

15 Jahre sind in der Evolutionsbiologie nicht mehr als ein Augenzwinkern. Trotzdem gelang es Forschern jetzt, in dieser kurzen Zeitspanne einen evolutionären Prozess zu beobachten.

Noch in den 1990er Jahren lebte der Rotkehlanolis, eine grüne Echtenart mit markantem, rotem Kehlsack, allein im Süden der USA, seit einiger Zeit dringt jedoch eine verwandte Echse, der Bahamaanolis, in dessen angestammtes Revier. Diese Situation nutzen 1995 Forscher der [University of Texas in Austin](#) für ein Evolutionsexperiment: Sie siedelten den Neuankömmling

TODD CAMPBELL UND ADAM ALGAR

gezielt auf drei kleinen Inseln an, die zuvor allein der Rotkehlanolis bewohnte. Seitdem beobachten sie, wie sich die Konkurrenz der beiden Echtenarten auf die Tiere auswirkt – ein Experiment, das ihnen die Erforschung von Evolutionsvorgängen unter kontrollierten Bedingungen und in Echtzeit ermöglichen soll.

Die beiden Echtenarten gehören zur selben Gattung und gleichen sich in ihren Ansprüchen. Sie stehen deshalb in Konkurrenz um Futter und Lebensraum zueinander. Schon wenige Monate nach dem Ansiedeln der neuen Echtenart *Anolis sagrei* stellten die Forscher um Yoel Stuart fest, dass sich die heimischen *Anolis carolinensis* vermehrt in den höheren Baumregionen aufhielten. Zuvor hatten die Reptilien auf allen Teilen des Baumes gelebt. **Und nun zeigte sich sogar:** Die Füße der einheimischen Anolis haben sich an die höheren Kletteranforderungen angepasst. Die Haftsohlen an ihren Füßen wurden größer und erleichtern ihnen so vermutlich den Halt an dünnen Ästen in Baumwipfeln. Damit haben die Tiere innerhalb von nur zehn Jahren, also in 20 Echengenerationen, merklich auf die veränderte Situation reagiert.

Jene Inseln, die die Bahamaanolis auch nach 15 Jahren nicht erreicht hatten, dienten den Forschern als Kontrollgruppe. Der Vergleich zeigte, dass sich nur die Füße derjenigen Echten verändert hatten, die mit der Konkurrenz durch die neue Echtenart konfrontiert waren. Es scheint also keinen zufälligen umweltbedingten Trend zu größeren Füßen zu geben. Daher dürfte es sich nach Meinung der Forscher mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen typischen evolutionären Selektionsprozess handeln: Tiere mit Erbanlagen für größere Füße haben in der Konkurrenzsituation eine höhere Überlebenschance und setzen sich infolgedessen in der Population durch, so dass mit der Zeit die Größe des Körperteils immer weiter zunimmt.

Dass es sich tatsächlich um eine solche dauerhafte genetische Veränderung handelte, belegte die Gegenprobe: Die Forscher ließen Anolish Nachwuchs von Inseln mit und ohne Konkurrenz in einem neutralen Umfeld schlüpfen und aufwachsen. Auch hier offenbarten nur diejenigen Tiere die charakteristischen, größeren Haftpolster an ihren Füßen, deren Vorfahren sich den Lebensraum mit dem Konkurrenten hatten teilen müssen – und von denen sie die



YOEL STUART, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

FUSS EINES ROTKEHLANOLIS

Die Lamellen der Haftpolster geben dem Rotkehlanolis sicheren Halt beim Klettern.

Anlagen für den großen Fuß erbten. Welche genetischen Veränderungen für das Fußwachstum ausschlaggebend sind, haben die Wissenschaftler allerdings noch nicht ermittelt. <

(Spektrum.de, 23. Oktober 2014)

Science 10.1126/science.1257008, 2014



EVOLUTION DES MENSCHEN

Warum allein der Mensch ein Kinn hat

von Jan Dönges

Selbst unsere nächsten Verwandten, die Neandertaler,
hatten es nicht: das Kinn. Warum sind wir im Besitz eines
so merkwürdigen Körperteils?

Es ist natürlich irgendwie trivial, aber der Grund, weshalb das Kinn so interessant ist, liegt darin, dass wir die einzigen sind, die eines haben«, sagt Nathan Holton von der University of Iowa. In der Tat: Wer sich die untere Gesichtspartie von Schimpansen oder Neandertalern anschaut, wird sehen, über ein ausgeprägtes Kinn verfügt keine der beiden uns so nah verwandten Spezies. Wie kommt es, dass ausgerechnet den menschlichen Kiefer ein derart herausstechendes Merkmal zierte?

Eine Theorie besagt, dass das Kinn die Kräfte besser auffangen kann, denen der menschliche Schädel beim Kauen unterworfen ist. [Doch diese Deutung wollen Holton und Kollegen widerlegt haben](#). Die Wissenschaftler haben dazu anatomische Messungen von 40 Menschen analysiert, die von früher Kindheit an bis ins Erwachsenenalter vorgenommen worden waren. Dabei zeigten sich keinerlei Hinweise darauf, dass Belastung am Kieferknochen zu einem Wachstum des Kinns führte. Versuchspersonen, die die stärkste Belastung im Kieferbereich zeigten, hatten sogar tendenziell das kleinste Kinn. Wenn aber nicht mechanische Belastung die Herausbildung

des Kinns erklärt, was dann? Die Forscher sehen hier eine Folge übergeordneter Entwicklungsprozesse, die sich dann auch auf die untere Gesichtspartie auswirkten – den Kiefervorsprung verdanken wir somit mehr oder weniger dem Zufall. Nach Meinung der Wissenschaftler um Holton entstand er, weil bei Menschen [in den letzten Jahrzehntausenden das Gesicht immer weiter schrumpfte](#) – es ist nun rund 15 Prozent kleiner als bei Neandertalern.

Das Kinn gehört zu unserem »domestizierten« Gesicht

Den Grund dafür sehen die Wissenschaftler in der »Selbstdomestizierung« des Menschen. Laut dieser Theorie hat der menschliche Körper im Lauf der Evolution seine »wildenen«, aggressiven Merkmale verloren und [Entwicklungen durchgemacht, wie man sie auch bei Haustieren beobachten kann](#). Seitdem wir in immer größeren Gruppen zusammenleben, könnten diejenigen mit weniger aggressiven Gesichtszügen im Vorteil sein, weil ihnen ihr friedliches Äußeres die Zusammenarbeit mit anderen erlaubt. Hormonelle Veränderungen sollen diese Prozesse angetrieben haben. Um nun allerdings aus einem runden

Kleinkindschädel ohne Kinn – also vom Neandertalertypus – ein relativ kleines, steileres Erwachsenengesicht zu machen, müssen in den Jahren des Heranwachsens diverse Verschiebungen vorgenommen werden, an deren Ende unter anderem die Herausbildung eines Kinns steht, erläutert Holton. Es sei wie bei einem 3-D-Puzzle, in dem die Teile immer wieder neu arrangiert werden.

»Unsere Studie zeigt, dass das hervorspringende Kinn nichts mit der Funktion (des Kiefers) zu tun hat«, fasst Holton zusammen, »sondern wahrscheinlich eher mit räumlichen Veränderungen während der Entwicklung.«

(Spektrum.de, 14. April 2015)



MENSCH VS. SCHIMPANSE

WER HAT DIE MODERNERE HAND?

von Jan Dönges

Das vermeintliche »Präzisionswerkzeug« ist womöglich gar keine menschentypische Anpassung, sagen Forscher, sondern uralt – jedenfalls verglichen mit den Händen eines Schimpansen

In der »klassischen« Evolutionsgeschichte der menschlichen Hand geht man davon aus, dass die gemeinsamen Vorfahren von Menschen und Menschenaffen die charakteristischen langen Finger und den kurzen Daumen hatten, die man heutzutage bei Schimpanse und Co beobachtet. Durch die Erfordernisse des Werkzeuggebrauchs änderten sich die Hände des Menschen jedoch mit der Zeit, und die Evolution verlieh uns eine Art anatomisches Wunderwerk für Präzisionsarbeiten.

An dieser Sicht der Dinge rütteln Anthropologen um Sergio Almécija von der George Washington University in Washington, D. C. Die Wissenschaftler haben die Hände von zahlreichen lebenden und ausgestorbenen Affenarten untersucht und gehen nun davon aus, dass die Hände ursprünglicher Affen – wie etwa die des letzten gemeinsamen Vorfahren von Mensch und Schimpanse – eher denen heutiger Menschen ähnelten, nicht aber den Händen von Schimpansen. Im Gegenteil: Deren Hände sowie die von Orang-Utans stellten die moderne Anpassung an ein Leben in Bäumen dar; besonders die langen Finger und der kurze Daumen machen die

Fortbewegung im Geäst leichter. Die Menschhand dagegen habe viele archaische Merkmale konserviert.

Haben die Wissenschaftler Recht mit ihrer ([von Fachkollegen kritisierten](#)) Analyse, legt dies nahe, dass das althergebrachte Bild unserer Urahnen als Baumbewohner, die sich an ein Leben auf dem Boden anpassten, überdacht werden muss. In dieser Sicht der Dinge ist die Lebensweise etwa heutiger Schimpansen ein Sonderweg, der diverse Anpassungen mit sich brachte. <

(Spektrum.de, 15. Juli 2015)

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

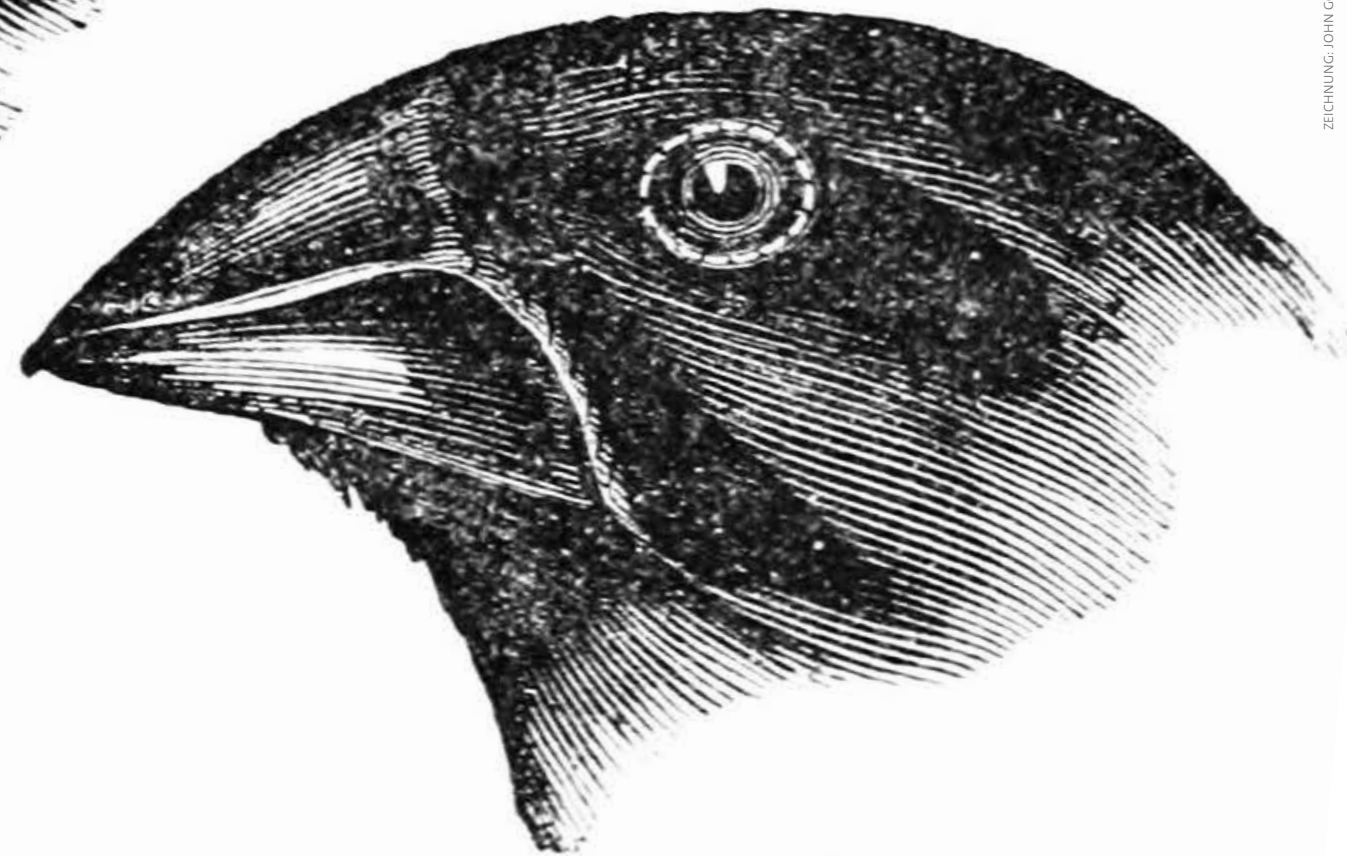
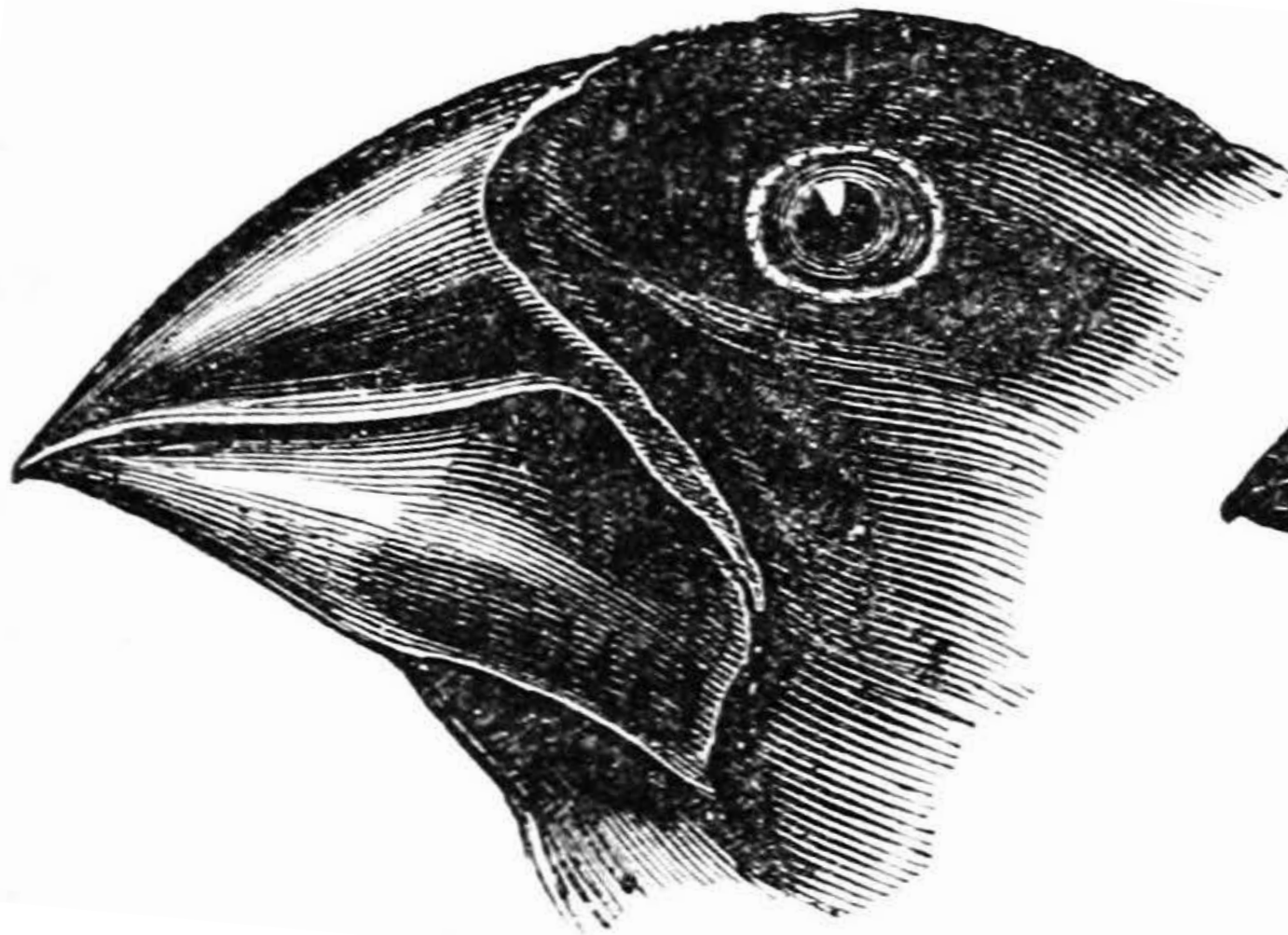
REGEN- WÄLDER

Bedrohtes Paradies

Amazonien | Der letzte weiße Fleck
Zentralafrika | Palmöl gegen Primaten
Nicaraguakanal | Jahrhundertwerk
oder Desaster?

FÜR NUR
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



MEINUNG

Brauchen wir eine **NEUE EVOLUTIONSTHEORIE?**

Seit Charles Darwin hat sich in der Evolutionsbiologie und in den angrenzenden Fachgebieten viel getan. Ist die Evolutionstheorie damit inzwischen veraltet? Ein Pro und Kontra.

von Kevin Laland, Gregory A. Wray
und Hopi E. Hoekstra

Ja, unbedingt!

Ohne Ausweitung der Evolutionstheorie vernachlässigen wir wichtige Prozesse, meinen **KEVIN LALAND UND SEINE KOLLEGEN**.

Schon **Charles Darwin** sprach von Evolution durch natürliche Selektion – ohne überhaupt von der Existenz der Gene zu wissen. Die heute gängige **Evolutionstheorie** fokussiert fast ausschließlich auf genetische Vererbung und Prozesse, welche die Häufigkeit der Gene beeinflussen.

Diese begrenzte Sichtweise wird aber zunehmend von neuen Erkenntnissen aus benachbarten Forschungsgebieten geschwächt. So kristallisiert sich langsam ein

anderes Bild der Evolution heraus, bei dem auch Wachstums- und Entwicklungsprozesse der Organismen als Ursachen der Evolution auftreten.

Vor sechs Jahren trafen sich einige von uns zum ersten Mal und diskutierten über neue Ansätze. Inzwischen befassen wir uns als interdisziplinäres Team sehr intensiv mit einem weiter gefassten Rahmenwerk, genannt »**Erweiterte Synthese in der Evolutionstheorie**« (extended evolutionary synthesis [1], EES). Hierfür wollen wir Struktur, Prämissen und Vorhersagen er-

GEORGE RICHMOND: PORTRAIT CHARLES DARWIN, 1830ER / PUBLIC DOMAIN



DER JUNGE DARWIN

Charles Darwin im Alter von 29 Jahren auf einem Aquarell von George Richmond.

arbeiten. In der EES sollen wichtige Evolutions-Driver, die nicht auf Gene zurückzuführen sind, in das dichte Geflecht der Evolutionstheorie integriert werden.

Damit wird die EES ein ganz neues Licht auf die Evolution werfen. Wir glauben, Organismen bilden sich während der Entwicklung erst langsam heraus und sind nicht einfach durch ihre Gene vorprogrammiert. Lebewesen entwickeln sich nicht dergestalt, dass sie in eine vorgefertigte Umgebung passen. Vielmehr entwickeln sie sich zusammen mit ihrer Umgebung, in einem Prozess, der auch die Struktur ganzer Ökosysteme beeinflussen kann.

Inzwischen fordern immer mehr Biologen, das Konzept der Evolutionstheorie anzupassen. Rückenwind hierfür kommt aus den Nachbardisziplinen, vor allem der Entwicklungsbiologie, aber auch der Genetik, der [Epigenetik](#), der Ökologie und den Sozialwissenschaften [1,2]. Wir stehen für eine Revision der Evolutionsbiologie, damit sie uneingeschränkt von den Erkenntnissen dieser Bereiche profitieren kann. Und immer mehr Forschungsergebnisse untermauern unsere Position.

Allein die Erwähnung der EES führt aber oft schon zu emotionalen oder gar feind-

seligen Reaktionen von Seiten der Evolutionsbiologen. So wird häufig aus einer lebhaften Diskussion ein regelrechter Schlagabtausch mit Vorwürfen und Fehlinterpretationen. Vielleicht möchten die Evolutionsbiologen auch – gejagt vom Schreckgespenst des [Intelligent Design](#) – eine geschlossene Front gegenüber wissenschaftsfeindlichen Ansätzen bilden. Hinzu kommt die Sorge, man könne weniger Forschungsgelder und Anerkennung erhalten, wenn Outsider wie Physiologen und Entwicklungsbiologen in ihr Forschungsgebiet eindringen.

Mithin ist etwas ganz anderes noch wichtiger: Viele konventionell denkende Evolutionsbiologen untersuchen schon genau die Prozesse, die unserer Meinung nach mehr Beachtung bräuchten. Aber sie verstehen und interpretieren diese völlig anders als wir. Das ist kein Sturm im Wasserglas, sondern ein Kampf um die Seele der Evolution.

In diesem Statement hier legen wir die logische Basis der EES dar. Damit hoffen wir etwas Hitze aus der Diskussion zu nehmen und eine offene Debatte über grundlegende Ursachen des evolutionären Wandels anzuregen.

Wir stehen für eine
Revision der
Evolutionbiologie,
damit sie von
den Erkenntnissen
aller Disziplinen
profitieren kann

Kernaussagen

Das Herzstück der heutigen Evolutionstheorie wurde in den 1930er und 1940er Jahren geformt. Es kombiniert natürliche Selektion, Genetik und andere Aspekte in einem Gesamtmodell der Evolution. Die »Moderne Synthese« erlaubt eine mathematische Beschreibung des evolutionären Prozesses in Form von Häufigkeiten der Genvarianten in einer Population über die Zeit hinweg – beispielsweise die Ausbreitung der genetischen Resistenz der Kaninchen gegenüber dem Myxoma-Virus.

In den darauffolgenden Jahrzehnten wurden in der Evolutionsbiologie Konzepte integriert, die mit den Grundsätzen der Modernen Synthese vereinbar waren. Einer der Ansätze war die »Neutrale Theorie«, in der die Bedeutung von Zufallseignissen in der Evolution betont wird. Dennoch hält die Standardrevolutionstheorie (SET) in weiten Teilen an den Prämissen der ursprünglichen Modernen Synthese fest und prägt auch weiterhin das Bild der Evolution in der Öffentlichkeit.

Der Ansatz der SET ist einfach: Eine neue Variante entsteht durch zufällige genetische Mutation, und die Vererbung ist an die DNA gekoppelt. Außerdem ist die na-

türliche Selektion die einzige Ursache für **Adaptation**, ein Prozess, der dazu führt, dass die Organismen gut in ihre Umwelt passen. So gesehen wird die Komplexität biologischer Entwicklung, also jene Veränderungen während Wachstum und Altern des Organismus, auf eine sekundäre, untergeordnete Rolle reduziert.

Unserer Ansicht nach schafft es dieser genzentrierte Ansatz nicht, die volle Bandbreite an Mechanismen der Evolution zu erfassen. Zum Beispiel fehlt der Einfluss der physischen Entwicklung auf die Entstehung von **Variation** (»developmental bias«). Außerdem fehlt der direkte Einfluss der Umwelt auf die Merkmale der Organismen (Plastizität), die Veränderung der Umwelt durch die Organismen selbst (Nischenkonstruktion) und die Weitergabe von mehr als nur den Genen über Generationen hinweg (extragenetische Vererbung). In der SET sind diese Phänomene einfach nur Folgen der Evolution. In der EES hingegen gelten sie auch als Ursachen.

Wertvolle Einblicke in die Ursachen der Adaptation und das Auftreten neuer Merkmale kommen aus dem Bereich der evolutionären Entwicklungsbiologie. Doch einige ihrer experimentellen Befunde lassen

sich nur schwer in die SET integrieren. Besonders heikel ist die Beobachtung, dass ein Großteil der Variationen nicht zufällig geschieht, weil nämlich der Entwicklungsprozess einzelne Formen begünstigt [3]. Beispielsweise haben innerhalb einer Gruppe der Tausendfüßler alle der mehr als 1000 Arten eine ungerade Zahl an Beinsegmenten. Die Gründe dafür liegen im Mechanismus der Segmententwicklung [3].

Wie sich Organismen an ihre Umgebung anpassen und in viele verschiedene Arten aufteilen, lässt sich unserer Meinung nach mit dem Konzept der eingeschränkten Entwicklungsrichtung (»developmental bias«) erklären. So sind bestimmte Buntbarsche im Malawisee untereinander enger verwandt als mit den Buntbarschen im Tanganjikasee, obwohl die Arten beider Seen auffallend gleiche Körperformen haben [4]. Dabei finden sich immer bei einigen Fischen große fleischige Lippen, bei anderen eine hervorspringende Stirn und bei wieder anderen kräftige Unterkiefer.

Die SET erklärt solche Parallelen mit dem Phänomen der Konvergenz: Ähnliche Umweltbedingungen selektieren zufällige genetische Variationen, die zum vergleich-

baren Ergebnis führen. Um damit unabhängig voneinander entstandene, parallele Formen zu erklären, muss von einer außergewöhnlichen Koinzidenz ausgegangen werden. In einer etwas lapidareren Hypothese wirken »developmental bias« und natürliche Selektion zusammen [4,5]. Anstatt der Selektion freien Lauf über jegliche physische Möglichkeiten hinweg zu lassen, wird Selektion hier entlang spezifischer Routen geführt, die der Entwicklungsprozess eröffnet [5,6].

Um eine andere Art von Bias handelt es sich, wenn Individuen auf ihre Umgebung mit einer Formänderung reagieren – ein Phänomen, welches als Plastizität bezeichnet wird. Hierzu zählen beispielsweise Veränderungen der Blattform durch Salzwasser oder Chemikalien. Die SET betrachtet diese Plastizität lediglich als Feintuning oder Rauschen. In der EES hingegen gilt sie bereits als plausibler erster Schritt auf dem Weg zur Adaptation. Hierzu trägt hauptsächlich die Erkenntnis bei, dass die Plastizität den Organismen nicht nur erlaubt, mit neuen Umweltbedingungen zurechtzukommen, sondern auch für sie passende Merkmale zu generieren. Wenn die Selektion solche

genetischen Varianten aufrechterhält, die sich noch an geänderte Bedingungen anpassen können, dann entsteht Adaptation vorwiegend durch die Akkumulation genetischer Variationen, die Merkmale nach ihrem ersten Auftreten stabilisieren [5,6]. Mit anderen Worten: Oftmals tritt zuerst das Merkmal auf, gefolgt von Genvariationen, die das Merkmal zementieren, wenn auch manchmal erst Generationen später [5].

Wie Beobachtungen an Fischen, Vögeln, Amphibien und Insekten zeigen, wird die Besiedelung neuer Lebensräume durch umweltinduzierte Adaptationen begünstigt und die Artenbildung gefördert [5,6]. Die am besten untersuchten Beispiele hierfür findet man bei Fischen, wie dem Stichling oder dem arktischen Saibling. Unterschiede in der Ernährung und den Lebensbedingungen am Boden oder im offenen Gewässer haben unterschiedliche Körperformen entstehen lassen, die ihrerseits zur reproduktiven Isolation führten – eine Stufe auf dem Weg zu neuen Arten. Die Anzahl der Arten in einer Abstammungslinie hängt nicht nur davon ab, ob zufällige genetische Variationen durch verschiedene Umweltbedingungen ausge-

Oftmals tritt zuerst das Merkmal auf, gefolgt von Genvariationen, die das Merkmal zementieren, wenn auch erst Generationen später.

siebt werden. Sie beruht auch auf Entwicklungsmerkmalen, die zur »Evolvierbarkeit« der Linie beitragen.

Die SET betrachtet die Umwelt im Wesentlichen als »Hintergrundbedingungen«, welche die Selektion induzieren oder modifizieren, aber selbst nicht Teil des evolutionären Prozesses sind. Die SET macht keinen Unterschied zwischen der Anpassung der Termiten an ihre selbst gebauten Erdhügel und der Anpassung von Organismen an Vulkanausbrüche. Für uns sind das zwei fundamental unterschiedliche Dinge [7]. Vulkanausbrüche sind spezifische Ereignisse, die sich unabhängig von

der Aktivität der Organismen ereignen. Im Gegensatz dazu bauen und pflegen Termiten ihre Behausungen in einer reproduzierbaren und zielgerichteten Art und Weise, die durch vorausgegangene Selektion entstanden ist und weitere Selektion anregt. Ganz ähnlich ist es bei Säugetieren, Vögeln und Insekten, die ihre Behausungen verteidigen, erhalten und verbessern: Das sind adaptive Reaktionen, die sich fortlaufend weiterentwickelt haben [7]. Diese »Nischenkonstruktion« wie auch der »developmental bias« implizieren, dass Organismen ihre eigene Evolution mitgestalten, indem sie systematisch ihren Lebensraum verändern und die Selektion beeinflussen [7].

Vererbung jenseits der Gene

Die SET hat lange Zeit Vererbungsmechanismen außerhalb der Gene als Spezialfälle betrachtet, allen voran das Beispiel der menschlichen Kultur. Die EES hingegen erkennt explizit an, dass Ähnlichkeiten zwischen Eltern und Kinder auch darauf zurückzuführen sind, dass die Eltern ihre eigene Entwicklungsumgebung auch für ihre Nachkommen aufbauen. Diese »extragenetische Vererbung« schließt die Wei-

tergabe epigenetischer Marker ein, die als chemische Modifikationen zwar die DNA-Expression beeinflussen, aber nicht die DNA-Sequenz selbst. Dies betrifft die Fertilität, die Lebensdauer und die Widerstandskraft gegenüber Krankheiten quer durch alle Lebensgemeinschaften [8]. Die extragenetische Vererbung umfasst auch die Weitergabe des Sozialverhaltens von Tieren, wie etwa das Aufknacken von Nüssen bei Schimpansen oder das Migrationsverhalten von Riff-Fischen [8,9]. Sie betrifft auch veränderte Strukturen und Lebensbedingungen, welche die Organismen ihrer Nachkommenschaft auf Grund der Nischenkonstruktion hinterlassen – vom Biberdamm bis zum umgeackerten Erdboden bei Würmern [7,10]. Die Forschung der letzten zehn Jahre hat gezeigt, wie weit diese Art der Vererbung verbreitet ist, so dass sie nun auch Teil der allgemeinen Evolutionstheorie sein sollte.

Mathematische Modelle der Evolutionsdynamik unter Einbeziehung der extragenetischen Vererbung führen natürlich zu anderen Voraussagen als Modelle ohne deren Berücksichtigung [7-9]. Mit Hilfe inklusiver Modelle lassen sich eine Reihe rätselhafter Phänomene erklären, wie zum

Beispiel die rasche Kolonialisierung Nordamerikas durch den Hausfinken, die Anpassungsfähigkeit invasiver Pflanzen mit niedriger, genetischer Diversität und die Entstehung reproduktiver Isolation.

Solche Hinterlassenschaften können sogar makroevolutionische Muster generieren. So lassen Forschungsdaten beispielsweise darauf schließen, dass Schwämme den Ozean mit Sauerstoff versorgen und dadurch anderen Organismen die Grundlage für ein Leben auf dem Meeresboden schaffen [10]. Eine zunehmende Anzahl von Fossilien zeigt auch, dass die Vererbung von Modifikationen durch die Umgebung immer wieder die Evolution neuer Arten und Ökosysteme erleichtert hat, manchmal sogar erst Millionen von Jahre später [10].

Miteinander ist besser

Die erwähnten Erkenntnisse stammen aus verschiedenen Forschungsbereichen, passen aber mit erstaunlicher Kohärenz zusammen. So tritt Variation nicht zufällig auf, und die Vererbung ist mehr als nur die Weitergabe von Genen. Außerdem finden sich vielfältige Wechselwirkungen zwischen Organismen und ihrer Umgebung. Und nicht zuletzt ist die Entwicklung di-

rekte Ursache der Adaptation und Artenbildung sowie der Geschwindigkeit und Art des evolutiven Wandels.

Die SET formuliert diese Phänomene auf eine Weise, die ihre Bedeutung unterhöhlt. So würden der Selektion durch den »developmental bias« Entwicklungszwänge auferlegt, was aber nur das Ausbleiben von Adaptation erklärt. In der EES hingegen werden entwicklungsbiologische Prozesse als kreatives Element angesehen. Sie setzen den Rahmen für die Ausprägung von Formen und Merkmalen und sind folglich mitverantwortlich für die Eigenschaften der Organismen.

Wissenschaftler aus der Physiologie und Ökologie bis hin zur Anthropologie wehren sich gegen die einschränkenden Prämissen des Rahmenwerks der Standard-evolutionstheorie. Dabei ist ihnen gar nicht bewusst, dass sie mit ihren Ansichten nicht allein sind. Unserer Meinung nach regen verschiedene Blickrichtungen in der Wissenschaft die Formulierung alternativer Hypothesen an und stimulieren die empirische Arbeit. Die EES ist längst keine Protestbewegung mehr. Stattdessen bietet sie einen ernst zu nehmenden Rahmen, fördert nützliche Arbeiten und bringt die unterschiedlichsten Forscher unter dem Dach

Nein, alles ist gut.

Die Evolutionstheorie nimmt neue Erkenntnisse durch ständige Synthese auf, meinen **GREGORY WRAY, HOPI HOEKSTRA UND IHRE KOLLEGEN.**

einer einheitlichen Theorie zusammen, um so einen konzeptuellen Wandel in der Evolutionsbiologie herbeizuführen.

Im Oktober 1881, nur sechs Monate vor seinem Tod, veröffentlichte Charles Darwin sein letztes Buch. Das Werk mit dem Titel »Die Bildung der Ackererde durch die Tätigkeit der Würmer« (»The Formation of Vegetable Mould Through the Actions of Worms« [11]) verkaufte sich schnell, denn Darwin hatte sich bereits durch seine vorausgegangenen Veröffentlichungen einen Namen gemacht. Nun widmete er den niederen Lebewesen ein ganzes Buch, unter anderem weil sie als Beispiel für einen interessanten Feedback-Mechanismus dienen: Regenwürmer sind daran angepasst, in einer Umgebung zu leben, die sie sich selbst schaffen. Im Gespräch mit Gärtnern und in eigenen einfachen Experimenten

erfuhr Darwin vieles über Regenwürmer. Er hatte die Begabung, aus jahrelang gesammelten Beobachtungen und Daten wichtige Erkenntnisse über evolutionäre Prozesse zu ziehen. Dabei bediente er sich so unterschiedlicher Gebiete wie der Landwirtschaft, der Geologie, der Embryologie und der Verhaltensbiologie. Seitdem orientieren sich jegliche Ansichten zur Evolution an Darwins Faible für wissenschaftliche Beweise und die Integration von Informationen verschiedener Forschungsgebiete.

In den 1920er Jahren setzte ein tief greifender Wandel im evolutionären Denken ein, als eine Hand voll Statistiker und Genetiker das Fundament für umfassende Veränderungen legten. Ihre Arbeit aus den Jahren 1936 bis 1947 gipfelte in der Formulierung der so genannten »Modernen Synthese«, die Darwins Konzept der natürli-

chen Selektion mit der gerade aufkommenden Genetik und – in geringerem Maße – der Paläontologie und Systematik vereinigt. Damit legten sie die theoretische Grundlage für ein umfassendes und gründliches Verständnis von Adaptation und Artenbildung – zwei der fundamentalsten Prozesse der Evolution.

Seitdem haben Generationen von Evolutionsbiologen die Rahmenbedingungen der Modernen Synthese vielfältig modifiziert, korrigiert und erweitert. Wie Darwin nutzten auch sie die Erkenntnisse anderer Fachgebiete. Als Molekularbiologen die DNA zur materiellen Basis der Vererbung und Merkmalsvariation erklärten, wurde die Evolutionstheorie wesentlich erweitert. Die Erkenntnis, dass viele genetische Veränderungen gar keine Auswirkung auf die Fitness eines Organismus haben, brachte die Populationsgenetik einen großen Schritt weiter. Darüber hinaus führte die Entdeckung der scheinbar »eigennützigen« DNA zur Diskussion über Selektion auf der Ebene der Gene statt der Merkmale. Hinzu kam auch das Konzept der VerwandtschaftsSelektion, das die Selektion von Merkmalen beschreibt, die Verwandte des Organismus

beeinflussen [12]. Trotzdem behaupten manche Evolutionsbiologen, die gängige Theorie sei inzwischen schon viel zu starr um das Konzept der Gene herum zementiert. Genauer gesagt treten sie dafür ein, dass vier Phänomene bedeutende evolutionäre Prozesse sind: phänotypische Plastizität, Nischenkonstruktion, inklusive Vererbung und »developmental bias«. Dem stimmen wir auch voll und ganz zu und wir beschäftigen uns selbst damit.

Allerdings müssen diese Prozesse unserer Meinung nach nicht dermaßen in den Fokus gerückt werden, dass die Einführung einer neuen Bezeichnung wie »Erweiterte Synthese in der Evolutionstheorie« gerechtfertigt ist. Im Folgenden skizzieren wir drei Gründe, weshalb die Themen bereits ausreichend Raum in der herkömmlichen Evolutionstheorie haben.

Neue Namen für alte Konzepte

Die von Laland und Kollegen favorisierten evolutionären Phänomene sind bereits gut in der Evolutionsbiologie verankert und liefern seit Langem wichtige Erkenntnisse. Allerdings gehen all diese Konzepte letztlich doch auf Darwin selbst zurück. Ein gutes Beispiel hierfür ist Darwins Forschung

am Feedback-Mechanismus bei Regenwürmern im Rahmen ihrer Anpassung an ein Leben in der Erde.

Heutzutage bezeichnen wir das Phänomen als Nischenkonstruktion. Die neue Bezeichnung ändert aber nichts an der Tatsache, dass Evolutionsbiologen bereits seit mehr als einem Jahrhundert Feedback-Mechanismen zwischen Organismen und ihrer Umwelt erforschen [13]. So erstaunliche Adaptationen wie Termitenhügel, Biberdämme und das Balzverhalten der Laubenvögel waren lange Zeit im Fokus der Evolutionsstudien.

Nicht weniger spektakulär sind Vorgänge, die nur unter dem Mikroskop oder auf molekularer Ebene zu erkennen sind. Hierzu zählen Viren, die Wirtszellen für ihre Fortpflanzung überfallen, oder das Phänomen des Quorum Sensing, eine Art Gruppendenken bei Bakterien.

Auch der Prozess der phänotypischen Plastizität hat die Evolutionsbiologen bereits in beachtlichem Maß beschäftigt. Es gibt zahllose Fälle, in denen die Umgebung die Variation von Merkmalen beeinflusst – angefangen beim Buntbarschkiefer, der seine Form ändert, sobald sich seine Nahrungsquelle wandelt, bis hin zur Blattmi-

mikry von Insekten, die braun gefärbt sind, wenn sie in der trockenen Jahreszeit geboren werden, und grün, wenn es feucht ist. Der technologische Fortschritt der letzten 10 Jahre hat gezeigt, welche erstaunliche Plastizität der Genexpression als Antwort auf verschiedene Umweltbedingungen möglich ist. Mit dieser Einsicht lässt sich nun auch ihre materielle Basis besser verstehen. Gegenstand heftiger Diskussionen war auch das Buch [5] der Verhaltensbiologin Mary Jane West-Eberhard. Sie beschrieb darin, wie phänotypische Plastizität den genetischen Veränderungen im Rahmen der Adaptation vorausgeht.

Somit ist keines der von Laland und seinen Kollegen propagierten Phänomene in der Evolutionsbiologie vernachlässigt worden. Wie alle Ideen müssen sich jedoch auch diese als schlüssig, empirisch oder diskutabel erweisen. Die Prominenz der vier Phänomene in der Diskussion um die gegenwärtig gültige Evolutionstheorie spiegelt nur ihre Erklärungskraft wider, nicht mangelnde Beachtung.

Moderne Ausweitung

Dabei stellen die von Laland und seinen Kollegen favorisierten Phänomene nur vier

Aspekte unter vielen anderen dar, die für zukünftige Fortschritte in der Evolutionsbiologie von Bedeutung sein könnten. Die meisten Evolutionsbiologen haben eine ganze Liste von Themen, die sie gerne ausführlicher behandelt sehen würden. Für die einen ist die Epistase, komplexe Interaktionen zwischen genetischen Varianten, bisher unterschätzt worden. Andere würden sich mehr für die kryptische genetische Variation einsetzen, also Mutationen, die sich nur unter bestimmten genetischen oder umweltbezogenen Bedingungen auswirken. Wieder andere würden die Extinktion, die Anpassung an klimatische Veränderungen oder die Evolution von Verhalten mehr betonen. Die Liste ist noch lang.

Wir können viel darüber diskutieren, ob all diese Phänomene nicht schon genug berücksichtigt wurden. Wir können aber auch die Ärmel hochkrempeln, uns an die Arbeit machen und ihre tatsächliche Bedeutung herausfinden, indem wir die theoretischen Grundlagen festlegen und eine solide Sammlung empirischer Studien aufbauen. Ewige Diskussionen bringen die Idee auch nicht weiter. Was Laland und Kollegen als die Standardevolutionstheorie bezeichnen, ist eher eine Persiflage auf ein stati-

Die gegenwärtige
Evolutionstheorie ist
alles andere als in der
Vergangenheit
verhaftet

sches und gigantisches Feld. Ihrer Meinung nach sind Evolutionsbiologen heutzutage nicht mehr bereit, Althergebrachtes durch neue Ideen in Frage zu stellen.

Wir sehen das ganz anders. Für uns ist es ein Privileg, in einer Zeit der spannendsten und fortschrittlichsten Evolutionsforschung seit der Einführung der Modernen Synthese zu leben und zu arbeiten. Die gegenwärtige Evolutionstheorie ist alles andere als in der Vergangenheit verhaftet. Im Gegenteil, sie ist dynamisch, kreativ und im Aufwind. Heutige Evolutionsbiologen schöpfen aus den unterschiedlichsten Forschungsfeldern wie der Genomik, der Me-

dizin, der Ökologie, der künstlichen Intelligenz und der Robotik. Darwin würde dem zustimmen.

Kernpunkt sind die Gene

Laland und Kollegen bezeichnen unsere Sichtweise als genzentriert. Würden wir sie relativieren, würden wir aber genau den Baustein der Evolutionstheorie herabwürdigen, welcher die beste Vorhersagekraft sowie die breiteste Anwendbarkeit hat und empirisch nachgewiesen ist. Veränderungen im Erbgut haben einen wesentlichen Anteil an Adaptation und Artenbildung. Für zahllose Beispiele der Adaptation wurde die genetische Grundlage auch genau belegt, seien es Antibiotikaresistenzen in Bakterien, die Tarnfärbung von Hirschmäusen oder die Laktosetoleranz beim Menschen.

Obwohl genetische Veränderungen für die Adaptation nötig sind, spielen manchmal nichtgenetische Prozesse bei der Art und Weise der Entwicklung von Organismen eine wichtige Rolle. Laland und seine Kollegen haben schon Recht damit, dass die phänotypische Plastizität zur Anpasstheit eines Individuums beiträgt. Ein Keimling wächst bekanntermaßen zum Licht hin, wird zum Baum und hat dann

eine andere Wuchsform als seine Geschwisterbäume. Viele Untersuchungen haben gezeigt, wie nützlich diese Art der Plastizität sein kann und wie sie zur Entwicklung beiträgt, sofern sie genetische Variation nach sich zieht [14]. Die Rolle der Plastizität im evolutionären Wandel ist so gut dokumentiert, dass sie nicht noch einmal besonders hervorgehoben werden muss.

Weniger klar ist die Frage, ob die Plastizität die genetische Variation im Rahmen des Adaptationsprozesses steuern kann. Vor über 50 Jahren beschrieb der Entwicklungsbiologe Conrad Waddington einen Prozess, den er genetische Assimilation nannte [15]. Dabei können neue Mutationen eine plastische Eigenschaft in eine andere umwandeln, die sich im Folgenden auch ohne die spezifische Ursache ausbildet. Außerhalb vom Labor gibt es dafür nur wenige Beispiele. Ob dies nun daran liegt, dass dieses Phänomen bisher nicht ernsthaft beachtet wurde, oder ob es sich um eine echte Rarität in der Natur handelt, können wir nur durch weitere Untersuchungen herausfinden.

Mangels Beweisen ist es auch schwierig, die Rolle des »developmental bias« auf die

Alle vier von Laland und
seinen Kollegen
propagierten
Phänomene sind
lediglich Erweiterungen
der zentralen Prozesse
des evolutionären
Wandels

Evolution adaptiver Merkmale (oder auf deren Ausbleiben) zu definieren. Entwicklungsprozesse, die auf der spezifischen, genetischen Ausstattung einer Population basieren, beeinflussen sicherlich die von der natürlichen Selektion betroffenen Merkmale. Letztendlich geht es aber weder um den Umfang der Merkmalsvariation noch um den genauen Auslösemechanismus. Ausschlaggebend sind lediglich die vererbten Unterschiede der Merkmale, insbesondere jene mit selektivem Vorteil. Ebenso wenig gibt es stichhaltige Beweise für eine tragende Rolle vererbter, epigene-

tischer Modifikationen (ein Teil der so genannten »inklusive Vererbung«) auf die Adaptation. Kein einziges neues Merkmal ist bekannt, das nur auf epigenetischen Mechanismen und nicht auch auf seiner Gensequenz beruht. Beide Aspekte sollten genauer untersucht werden.

Alle vier von Laland und seinen Kollegen propagierten Phänomene sind lediglich Erweiterungen der zentralen Prozesse des evolutionären Wandels, die da sind: natürliche Selektion, Drift, Mutation, Rekombination und Genfluss. Keine der geforderten Erweiterungen ist essenziell für die Evolution, wenngleich sie den evolutionären Prozess unter gewissen Umständen modifizieren können. Sie sind es in jedem Fall wert, weiter untersucht zu werden.

Wir laden Laland und seine Kollegen ein, mit uns gemeinsam eine umfassendere Ausweitung des Modells zu erarbeiten, anstatt inhaltliche Trennungen zu erwägen, die es gar nicht gibt. Wir begrüßen ihre Ideen als einen wichtigen Teil dessen, wozu die Evolutionstheorie vielleicht in Zukunft werden könnte. Wir wollen – genauso wie sie – eine erweiterte Synthese der Evolutionstheorie. Für uns steht der Begriff nur nicht derart im Fokus, weil unsere Ansätze

schon immer in diese Richtung gingen [16]. Die wirklich interessanten Phänomene wie phänotypische Plastizität, inklusive Vererbung, Nischenkonstruktion und »developmental bias« (und sehr viele mehr) in ihrer Bedeutung aufzuwerten, erreichen wir am besten mit stärkeren Beweisen.

Darwin hatte bereits mehr als 40 Jahre lang Daten gesammelt, bevor er die Behauptung aufstellte, Regenwürmer hätten »in der Geschichte der Welt eine weitaus größere Rolle gespielt als gemeinhin angenommen« [11]. Und selbst dann veröffentlichte er dies nur aus der Befürchtung heraus, bald »zu ihnen zu gehören« [17].

Dieser Artikel erschien unter dem Titel
»Does evolutionary theory need a rethink?«
in Nature 514, S.161–164, 2014

(Spektrum.de, 28. November 2014)

[1] Pigliucci, M. & Müller, G. B.

Evolution: The Extended Synthesis (MIT Press, 2010).

[2] Noble, D. et al. J. Physiol. 592, 2237–2244 (2014).

[3] Arthur, W. Biased Embryos and Evolution (Cambridge Univ. Press, 2004).

[4] Brakefield, P. M. Trends Ecol. Evol. 21, 362–368 (2006).

[5] West-Eberhard, M. J. Developmental Plasticity and Evolution (Oxford Univ. Press, 2003).

[6] Pfennig D. W. et al. Trends Ecol. Evol. 25, 459–467 (2010).

[7] Odling-Smee, F. J., Laland, K. N. & Feldman, M. W. Niche Construction: The Neglected Process in Evolution (Princeton Univ. Press, 2003).

[8] Jablonka, E. & Lamb, M. Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life (MIT Press, 2014).

[9] Hoppitt, W. & Laland, K. N. Social Learning: An Introduction to Mechanisms, Methods, and Models (Princeton Univ. Press, 2013)

[10] Erwin, D. H. & Valentine J. W.

The Cambrian Explosion: The Construction of Animal Biodiversity (Roberts, 2013).

[11] Darwin, C. The Formation of Vegetable Mould, Through the Actions of Worms (John Murray, 1881).

[12] Alcock, J. The Triumph of Sociobiology (Oxford Univ. Press, 2001).

[13] Bailey, N. W. Trends Ecol. Evol. 27, 561–569 (2012).

[14] Wada, H. & Sewall, K. B. Integ. Comp. Biol. <http://dx.doi.org/10.1093/icb/icu097> (2014).

[15] Waddington, C. H. Nature 150, 563–565 (1942).

[16] Callebaut, W. in Evolution: The Extended Synthesis (Pigliucci, M. & Müller, G. B. eds) 443–482 (MIT Press, 2010).

[17] Browne, J. Charles Darwin: The Power of Place Vol. II 479 (Jonathan Cape, 2003).

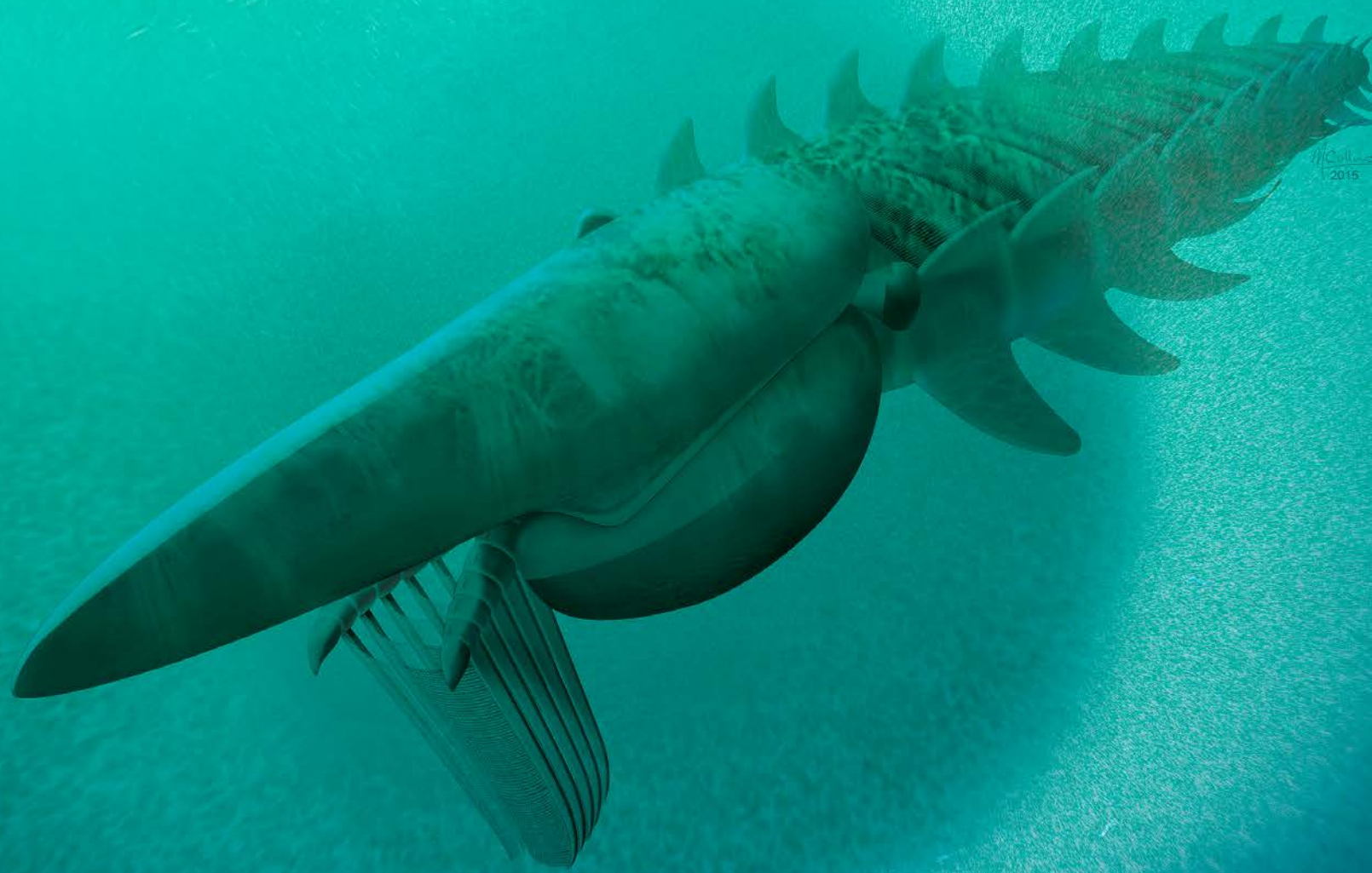
MEGAFAUNA

10 GIGANTISCHE TIERE der Erdgeschichte

von Daniel Lingenhöhl

Riesenseeskorpione, Titanenschlangen und autogroße
Gürteltiere – die Evolution brachte im Lauf der
Erdgeschichte immer wieder Extreme hervor.





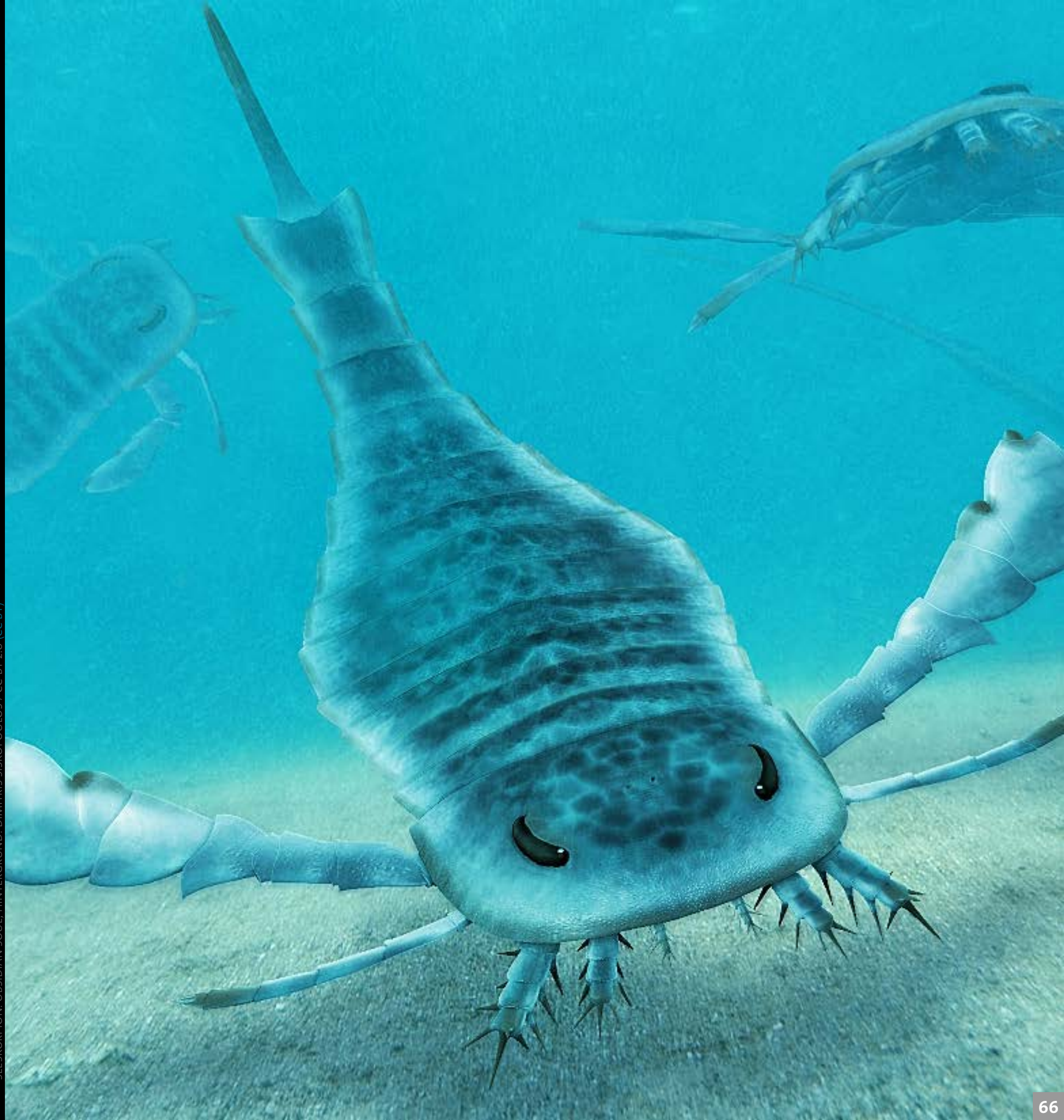
10. AEGIROCASSIS BENMOULAE – DER BLAUWAL DES KAMBRIUMS

Zu den ersten richtigen Riesen der Ozeane gehörten die *Anomalocarididae* – auf Deutsch so etwas wie »ungewöhnliche Garnelen«. Tatsächlich erinnert ihre Form ein wenig an Garnelen, und sie gehören auch zu den urigsten Verwandten der heutigen Insekten und Krebse. Meterlang konnten diese Tiere aus dem Kambrium vor 400 bis über 500 Millionen Jahren werden, doch nicht alle von ihnen waren gefürchtete Räuber, wie Paläontologen lange annahmen. Der abgebildete *Aegirocassis benmoulae* beispielsweise lebte eher wie unsere heutigen Bartenwale: Ruhig glitt er durch die Ozeane und filtrierte Plankton aus dem Wasser, während seine Vettern mit dornenbewehrten Fangzangen Jagd auf größere Beute machte. Immerhin: Seine ruhige Lebensweise sorgte dafür, dass *A. benmoulae* zu einem der größten bekannten Gliederfüßer heranwuchs.

9. EURYPTERUS – DIE RIESENSKORPIONE AUS DEM PERM

Zum Ende der Herrschaft der Anomalocariden entwickelten sich in den Ozeanen bereits die nächsten gigantischen Gliederfüßer: die See- oder Riesenskorpione wie dieses Exemplar der Gattung *Eurypterus*. Ihre Blütezeit lag im Ordovizium bis zum Perm vor 480 bis 250 Millionen Jahren. Unter ihnen existierten womöglich bereits einige Arten, die zumindest kurzfristig an Land gehen konnten, doch die meisten lebten dauerhaft im Meer. Sie sind weitläufig mit den Spinnen verwandt und erbeuteten mit ihren bezahnten Kieferzangen wohl auch schon die damaligen Wirbeltiere – zumindest kleinere Fische mussten sich vor ihnen in Acht nehmen.

SEESKORPION: OBSIDIAN SOUL; HINTERGRUND: DIMITRIS SISKIPOULOS / CC-BY-2.0 (CC BY)





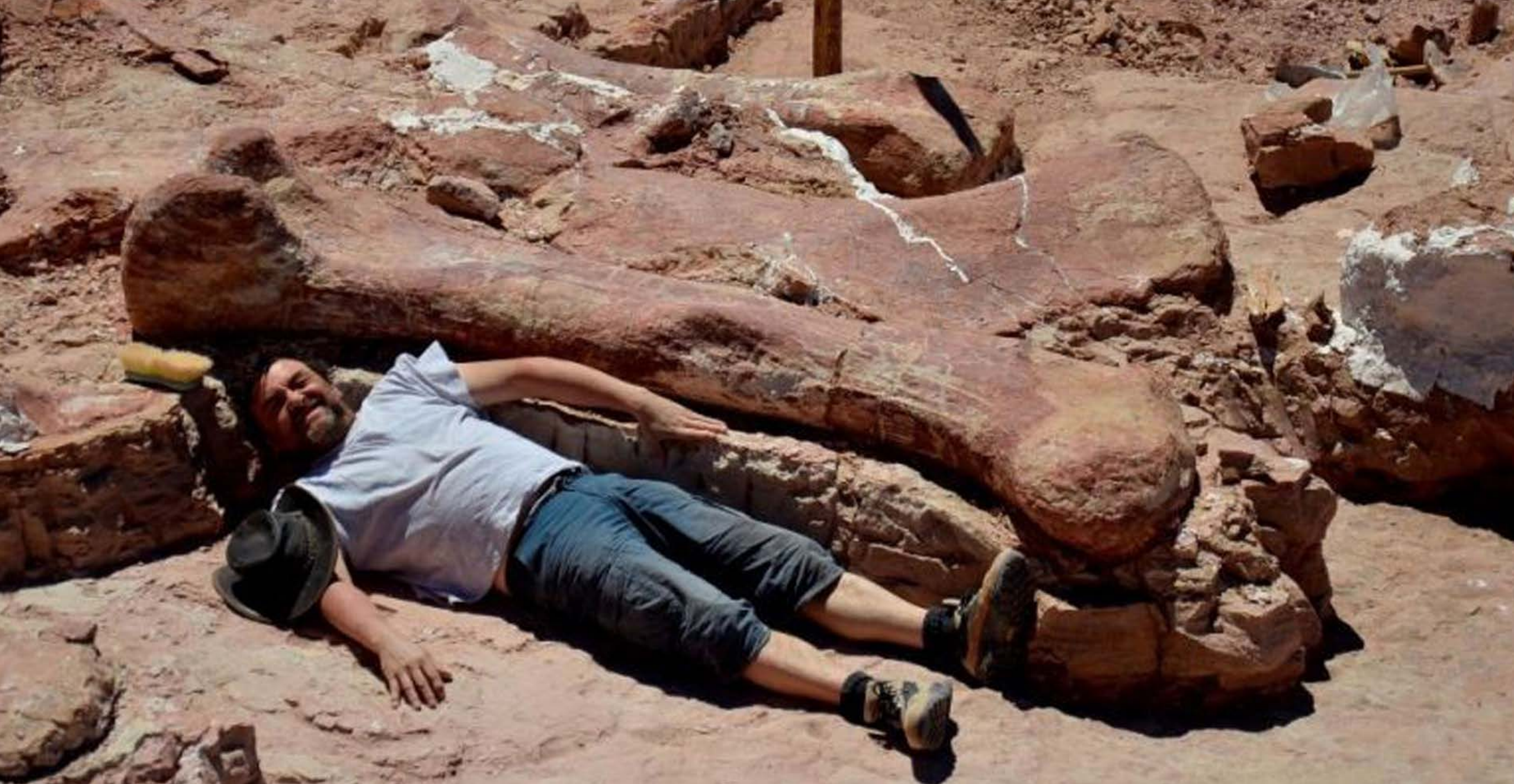
8. METOPOSAURUS ALGARVENSIS – DER RIESENSALAMANDER VON DER ALGARVE

Der Name täuscht: *Metoposaurus algarvensis* hatte nichts mit den Dinosauriern zu tun – im Gegenteil, die Art gehörte zu einer noch älteren Tierklasse, den Amphibien. Und natürlich kam es auch unter den Lurchen immer wieder zu Großformen wie diesem erst 2015 beschriebenen Riesensalamander. Mit einer Länge von bis zu zwei Metern und einem Gewicht von rund 100 Kilogramm übertrafen diese räuberischen Lurchen selbst noch die Chinesischen Riesensalamander (*Andrias davidianus*), die heute die größten lebenden Amphibien darstellen: Einzelne Berichte sprechen davon, dass es zumindest früher in klaren Bergbächen bis zu 1,8 Meter lange Exemplare gab.



7. SARCOSUCHUS IMPERATOR – DAS SUPERKROKODIL AUS AFRIKA

Die Kreidezeit und der Jura sind die Ära der Giganten. Doch nicht nur Dinosaurier neigten damals zum Größenwachstum, sondern auch verwandte Linien wie die Krokodile, die bereits seit 250 Millionen Jahren leben. Zu den imposantesten Vertretern dieser urigen Tierordnung gehörte sicherlich *Sarcosuchus imperator* aus Afrika, der im Englischen auch als SuperCroc bezeichnet wird. Mit einer Länge von bis zu zwölf Metern steckte er selbst die heutigen Leistenkrokodile in die Tasche, deren längstes bekanntes Exemplar etwas länger als sechs Meter war, die aber immerhin bis zu einer Tonne wiegen können. Übertroffen wurde das prähistorische Superkrokodil allerdings von urzeitlichen Verwandten wie *Purussaurus brasiliensis*, der zudem mit einem regelrechten Stahlgebiss ausgestattet war.



6. GIGANTOSAURIER – EIN NOCH NAMENLOSER RIESE AUS PATAGONIEN

Das Bild spricht Bände: Schon der Oberschenkelknochen übertrifft einen erwachsenen Mann. Und das Gewicht des noch namenlosen Sauriers aus der Kreidezeit vor 95 bis 100 Millionen Jahren entsprach dem einer kleineren Elefantenherde. Bis zu 80 Tonnen wog die Art aus der Gruppe der Titanosaurier, sie war 40 Meter lang und 20 Meter hoch, wenn das Tier seinen Hals reckte. Der verwandte *Argentinosaurus* brachte es dagegen wohl »nur« auf rund 70 Tonnen. Zuerst stieß ein ortsansässiger Landwirt bei La Flecha auf die Knochen und alarmierte die Paläontologen eines nahe gelegenen Museums. Das Team um Jose Luis Carballido grub anschließend mehr als 150 teils sehr gut erhaltene Knochen aus, was den bislang umfangreichsten Fund eines derartigen Riesen darstellt.



5. Titanoboa – die wahre Riesenschlange

Selbst Tigerpythons und Anakondas – die größten und schwersten Schlangen unserer Zeit – nehmen sich mickrig aus gegenüber *Titanoboa cerrejonensis*: Die Riesenschlange aus dem Paläozän vor rund 60 Millionen Jahren wog bis zu eine Tonne und wurde 14 Meter und länger. Sie lebte in den feuchtheißen Regenwäldern Südamerikas, wo 2009 Überreste in einem Kohlebergbau im Nordosten Kolumbiens frei gelegt wurden. Die Mine ist eine Goldgrube für Paläontologen: Sie entdeckten dort unter anderem auch eine reifengroße Schildkröte.



4. PELAGORNIS – DER A380 UNTER DEN VÖGELN

»Der obere Flügelknochen ist länger als mein gesamter Arm.« Mit diesen Worten deutet Dan Ksepka vom Bruce Museum in Greenwich bereits die gewaltigen Dimensionen von *Pelagornis sandersi* an: Der fossile Seevogel aus der Zeit des Oligozäns vor rund 25 Millionen Jahren gehört zu den gigantischsten flugfähigen Vögeln, die die Wissenschaft bislang gefunden hat. Mit einer Flügelspannweite von etwa 6,4 Metern lässt er heutige Riesen wie den Königsalbatros oder den Andenkondor wie Kleinvögel aussehen – beide bringen es auf maximal die halbe Flügellänge. Nur der bisherige Rekordhalter aus Argentinien, der Riesengeier *Argentavis magnificens*, könnte die von Ksepka beschriebene Art auf die Plätze verweisen, denn er brachte es wahrscheinlich auf sieben Meter Spannweite.



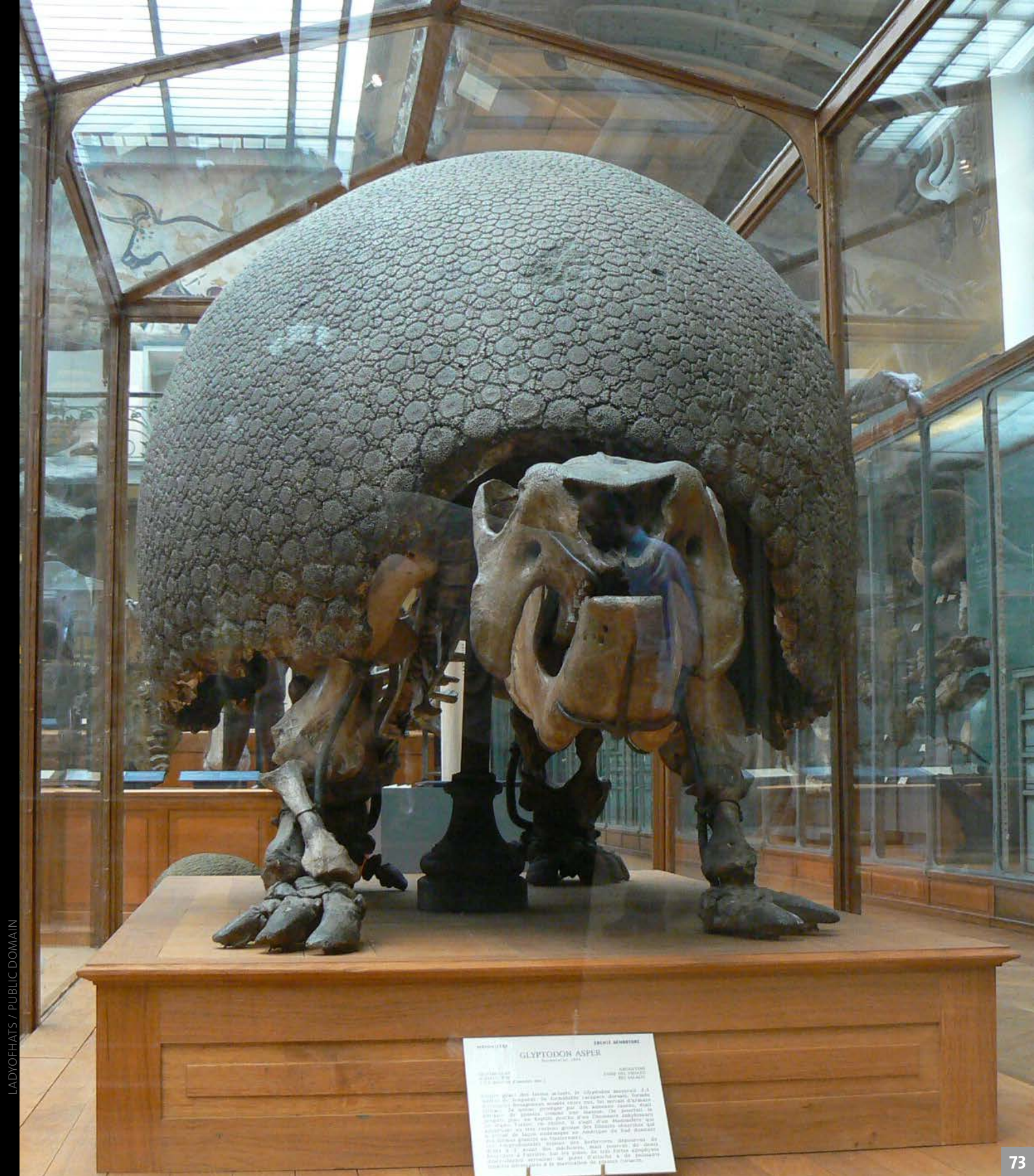
BROCKEN INAGLORY / CC-BY-SA-3.0 (CC BY-SA)

3. MEGALODON – UND DER WEISSE HAI KANN EINPACKEN

Mit bis zu 18 Metern Länge und 50 Tonnen Gewicht war der ausgestorbene Riesenhai *Megalodon* der ozeanische Schrecken seiner Zeit, dem Pliozän, das vor etwa 2,5 Millionen Jahre endete – der Weiße Hai wirkt verglichen damit fast wie ein Zwerg. Das zeigt auch ein Blick auf die Zähne: Die weißen Beißerchen des Weißen Hais wirken eher mickrig gegenüber dem fossilen Hauer von *Megalodon*. Mit seinem kräftigen Gebiss hielt der Riesenhai womöglich die Wale klein; zumindest zeugen Bissspuren in fossilen Walskeletten davon, dass *Megalodon* sie gerne fraß. Erst als er ausstarb, wurden die Meeressäuger größer.

2. GLYPTODON – DAS AUTOGROSSE GÜRTELTIER

Vor der Ankunft der ersten Menschen beheimatete Südamerika ein beeindruckendes Bestiarium gigantischer Arten – darunter zum Beispiel die Riesengürteltiere der Gattung *Glyptodon*. Mit einer Länge von mehr als drei Metern und über einer Tonne Gewicht entsprachen sie ungefähr einem VW Käfer. Manche der Riesengürteltiere besaßen keulenartige Schwänze, mit denen sie wuchtig zuschlagen und sich verteidigen konnten. Gegen die modernen Jäger der Art *Homo sapiens* nützte ihnen diese Waffe jedoch nichts mehr: Bald nach Ankunft der ersten Menschen in Amerika starben die urigen Säugetiere vor 12 000 Jahren leider aus.





1. BLAUWAL – GRÖSSER IST HEUTE KEINER

Im Gegensatz zu den Landtieren, wo die meisten Arten der nach der Eiszeit vorhandenen Megafauna ausgestorben sind, haben die Riesen des Meeres mehr Glück gehabt. Trotz der erbarmungslosen Jagd und Überfischung existieren in den Ozeanen weiterhin gigantische Lebewesen wie der **Blauwal** – das wohl schwerste Tier aller Zeiten mit einem Gesamtgewicht von 130 Tonnen und mehr. Der Walfang setzte ihnen schwer zu, **und bis heute haben sich die Bestände allenfalls regional erholt**. Da die Jagd aber zumindest zurzeit verboten ist, besteht Hoffnung, dass sich die Blauwale bald wieder häufiger in den Meeren zeigen. <

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

JETZT ABONNIEREN!

