

VOM WERDEN

UND VERGEHEN

VOM WERDEN UND VERGEHEN

ARTENVIELFALT IM WECHSEL VON EIS- UND WARMZEITEN

MARCUS KOCH

Es wird wärmer auf der Erde – und das ziemlich schnell. Der Klimawandel ist nicht mehr zu leugnen. Wechsel von kalten und warmen Perioden gab es in der Geschichte der Erde schon immer, und schon immer waren Lebewesen gezwungen, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Der derzeit sehr rasche Verlust an biologischer Vielfalt aber stellt die Frage nach den grundsätzlichen Prozessen der Artbildung – und ob sie schnell genug ablaufen können, um die Artenvielfalt bei derart massiv vom Menschen beeinflussten Veränderungen zu sichern.

S

Seit nahezu 2,6 Millionen Jahren wechseln sich auf der Erde warme und kalte Zeiten ab. Der Wechsel erfolgt mit einer ausgeprägten Rhythmik, wobei die Warmzeiten stets deutlich kürzer ausfallen als die Kaltzeiten. Die letzte Warmzeit gab es vor rund 125.000 Jahren. Sie dauerte etwa 11.000 Jahre und wurde von einer Kaltzeit abgelöst, die circa 100.000 Jahre herrschte. Derzeit befinden wir uns inmitten einer deutlich vom Menschen beeinflussten Warmzeit mit rasch steigenden Temperaturen.

Warum dieser Ausflug in die Klimageschichte der Erde, wenn es um die biologische Vielfalt, das Entstehen, die

Gefährdung von Arten und grundlegende Prozesse der Artbildung gehen soll? Steigende oder sinkende Temperaturen gehen mit gravierenden Veränderungen einher, von denen stets die gesamte belebte und unbelebte Umwelt betroffen ist. All dies geschieht in sehr großen Zeiträumen und in einem bestimmten räumlichen Kontext, die jeweils einen wichtigen – und häufig wohl limitierenden – Rahmen für evolutionäre Prozesse darstellen. Kurzum: Zeit und Raum müssen gemeinsam betrachtet werden, will man mehr darüber erfahren, wann und wie neue Arten entstehen und warum Arten aussterben.

Anpassen oder auswandern?

Es gibt viele Ursachen für das Artensterben. Eine ist die Konkurrenz um Raum und Ressourcen. So sehr sich Arten auch „aus dem Wege gehen“ und „ihre Nische suchen“ – Konkurrenz lässt sich nicht vermeiden. Ein anhaltender gravierender Mangel kann zu einem allmählichen Aussterben von Lebewesen führen, erst lokal, dann regional, eventuell stirbt dann die gesamte Art. Eine andere Ursache sind Katastrophen, etwa der sich global auswirkende Einschlag eines Meteoriten, ein sehr rasch voranschreitender Klimawandel oder das

gezielte Ausrotten von Lebewesen durch den Menschen, wofür das Verschwinden des Elefantenvogels auf Madagaskar vor rund 1.000 Jahren ein Beispiel ist.

Wenn sich die Umweltbedingungen für Lebewesen stark ändern, bleiben zum Überleben zwei Strategien: Entweder die Art passt sich den verändernden Bedingungen an (Adaptation) oder sie wandert und besiedelt neue Lebensräume, die den angestammten gleichen. Das Wandern können wir heutzutage bei zahlreichen invasiven Tier- und Pflanzenarten beobachten. Ihnen wurden die Wanderwege – die eher schnellen Autobahnen gleichen – vom Menschen eröffnet. Ohne das Zutun des Menschen setzt ein erfolgreiches Wandern voraus, dass die Art schneller vorankommt, als die Umweltveränderung fortschreitet. In einem natürlichen Kontext ist genau das häufig nicht gegeben. Die Wanderungsgeschwindigkeit ist deshalb ein limitierender Faktor. Und je komplexer die ökologischen Abhängigkeiten von Lebewesen sind, desto größer ist das Risiko, dass sie aussterben.

Eine weitere Voraussetzung für das erfolgreiche Wandern ist, dass es einen Raum gibt, in den eingewandert werden kann. Stellen Sie sich eine hochalpine Pflanze vor, der es an ihrem herkömmlichen Standort „zu warm wird“. Vielleicht wandert sie weiter den Gipfel hinauf. Und wenn sie den Gipfel des Berges erreicht hat und es ihr dann immer noch zu warm ist? Dann bleibt ihr nur ein benachbarter Gipfel, der noch höher und kälter ist. Aber wie dorthin kommen? Eine Pflanze ist für die Fernausbreitung – bei geringen Erfolgsaussichten – auf nur selten anzutreffende Hilfen angewiesen. Zudem ist es sehr wahrscheinlich, dass auch der Nachbargipfel von der Temperaturerhöhung betroffen ist. Zugegeben: Dieses Szenario ist plakativ und holzschnittartig, dennoch beschreibt es recht gut die Probleme und Limitierungen des Wanderns.

Ein Ausweg ist die Adaptation. Wenn sich Lebewesen an stark veränderte Umweltbedingungen anpassen, sterben die ursprünglichen Formen oder Arten in der Regel aus.



PROF. DR. MARCUS A. KOCH leitet seit dem Jahr 2003 die Abteilung Biodiversität und Pflanzensystematik am Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg, dessen Gründungsdirektor und derzeitiger geschäftsführender Direktor er ist. Er leitet zudem die Forschungsstelle Biodiversität und ist Direktor des Botanischen Gartens und des Herbariums der Universität Heidelberg sowie Gründungsvorstandsmitglied und derzeitiger stellvertretender Direktor des Heidelberg Center for the Environment (HCE) und ehemaliger Fellow des Marsilius-Kollegs. Vor seiner Berufung nach Heidelberg forschte und lehrte Marcus Koch von 1995 bis 2002 an Max-Planck-Instituten in Köln und Jena sowie an der University of Natural Resources and Life Sciences in Wien (Österreich). Seine Forschungsschwerpunkte liegen vor allem an den Schnittstellen von Biodiversitäts- und Evolutionsforschung.

Kontakt: marcus.koch@cos.uni-heidelberg.de

Es entstehen dann neue Formen, die besser an die neue Umwelt angepasst sind. Die Adaptation kann in Kombination mit der Wanderung erfolgen. Das macht es möglich, dass viele neue Arten entstehen.

Der aufschlussreiche Blick zurück

Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den grundlegenden Prozessen der Artbildung – von kleinen Populationen bis hin zu kompletten Pflanzenfamilien. Was uns interessiert, ist die Dynamik der Artbildung in Zeit und Raum. Dazu erfassen wir Umweltparameter, die heute für die Artbildung relevant sind, und rekonstruieren die vergangene Umwelt. Eine besonders wichtige Rolle spielt die Rekonstruktion der erdgeschichtlichen Vergangenheit. Nur so lassen sich die evolutionär-biologischen Prozesse verstehen, die der Artbildung zugrunde liegen.

Methoden, um vergangene biologische Prozesse zu rekonstruieren, gibt es viele. Wir arbeiten vor allem mit genetischen Daten, die uns dabei helfen, die Vergangenheit aus molekularen Signaturen abzulesen. Gegenüber allen anderen Methoden zur Rekonstruktion haben genetische Daten den Vorteil, dass dabei prinzipiell keine Zeitlücken auftreten: Veränderungen des Erbguts erfolgen kontinuierlich. Moderne molekulargenetische Verfahren erlauben es darüber hinaus, gezielt auf die Erbinformation eines Organismus zuzugreifen. Auf diese Weise können heute beim Wiederherstellen vergangener Evolutionsprozesse erstaunlich hohe zeitliche Auflösungen erreicht werden. Daraus ergibt sich die faszinierende Möglichkeit, Umweltdatensätze und biologische Datensätze ähnlich hoch aufgelöst gegenüberzustellen. Was sich dabei erkennen lässt, sollen die beiden nachfolgend dargestellten Beispiele zeigen.

Artbildung in kalten Zeiten

Die Familie der Kreuzblütler, zu der etwa die Acker-Schmalwand oder das Hirtentäschelkraut zählen, ist eine mit über 4.000 Arten weltweit anzutreffende Pflanzengruppe. Am häufigsten ist sie in den gemäßigten Zonen verbreitet. Immer wieder kommen Kreuzblütler aber auch in extremen Lebensräumen vor, etwa in den Alpen oder in der Arktis. In den letzten Jahren konnten wir das gesamte Artinventar dieser großen Familie beschreiben und haben nun eine gute Vorstellung über die verwandtschaftlichen Beziehungen.

Der Ursprung der Familie der Kreuzblütler ist im zentralasiatischen Raum zu suchen, die ältesten Evolutionslinien innerhalb der Familie sind etwa 30 Millionen Jahre alt. Während des gesamten Miozäns und Pliozäns – den erdgeschichtlichen Zeiträumen mit langsam sinkenden Temperaturen und einer global zunehmenden Trockenheit – veränderte sich die durchgehend hohe Diversifizierungsrate (die Summe aus Aussterbe- und Artbildungsrate) nur in einzelnen Evolutionslinien der Kreuzblütler gravierend.

Evolutionenbiologie in Heidelberg

Evolutionenbiologische Forschung hat in Heidelberg eine lange Tradition: Vor 158 Jahren übersetzte Heinrich Georg Bronn, Professor für Naturgeschichte der Universität Heidelberg, erstmals das Werk „Origin of Species“ von Charles Darwin ins Deutsche. Heute sind es vor allem die auf dem Campus verfügbaren und leicht zugänglichen technischen Infrastrukturen und Methoden wie die Genom-Sequenzierung, die evolutionenbiologische Fragestellungen Eingang finden lassen in nahezu alle Bereiche moderner lebenswissenschaftlicher Forschung.

„Moderne Techniken eröffnen die faszinierende Möglichkeit, Umweltdatensätze und biologische Datensätze in ähnlich hoher Auflösung gegenüberzustellen.“

Das konnten wir mit Stammbaumrekonstruktionen und Modellierungen nachweisen. Natürlich wurden in diesem Zeitraum keine tiefen mittleren Temperaturen erreicht wie im nachfolgenden Eiszeitalter (Pleistozän).

Derzeit versuchen wir herauszufinden, ob sich die Rate der Artbildung im Pleistozän – dem Zeitabschnitt der Erdgeschichte, der charakterisiert ist durch einen schnellen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten – geändert hat. Unsere bisherigen Ergebnisse deuten kaum auf starke Veränderungen hin. Es lässt sich auch keine deutlich gesteigerte Artbildungsrate in einzelnen Evolutionslinien feststellen, wie man es bei erheblichen Umweltveränderungen in vergleichsweise langen Zeiträumen erwarten könnte. Vielleicht sind die Zeiträume immer noch nicht lang genug, damit sich die im Miozän und Pliozän festgestellte Dynamik der Artbildung zeigt?

Wir meinen den Grund zu kennen, der für die große Vielfalt der Kreuzblütler auf Erden gesorgt hat: die häufige Verdopplung kompletter Erbgutsätze (Genome). Mehr als 40 Prozent aller heute vorkommenden Kreuzblütler sind polyploid, das heißt, sie besitzen mehr als die üblichen zwei Sätze von Chromosomen. Alle 4.000 Kreuzblütler-Arten haben mehrfache Genom-Verdopplungen hinter sich. Dem geht häufig eine Vermischung (Hybridisierung) mit anderen verwandten Arten voraus. Dafür müssen Arten sekundär miteinander in Kontakt kommen – und das geschieht nur, wenn sie gezwungen sind zu wandern. Gleichzeitig stellt die

genetische Durchmischung das evolutionäre Potenzial zur Verfügung, um sich zu verändern und anzupassen.

Artbildung im Wechsel von kalten und warmen Zeiten

„Periglazialgebiete“ sind Landschaften, die an Gletscher angrenzen und stark von ihnen bestimmt werden. Je ausgeprägter und dynamischer die Vereisungen der Gletscher sind, desto dynamischer verhalten sich auch periglaziale Landschaften. Diese Dynamik, darf man annehmen, wirkt sich auch auf die Prozesse der Artbildung aus. Tatsächlich konnten wir im nordöstlichen Alpenraum einen ausgeprägten Genfluss zwischen zwei Felsengänsekressen-Arten und das Entstehen einer neuen Hybrid-Art dokumentieren. Das von uns betrachtete Areal erstreckt sich über einige Hundert Quadratkilometer; unsere Daten haben wir mittels Genomanalyse mehrfach überprüft.

Das vereinfacht dargestellte evolutionäre Szenario sieht so aus: Während der vorletzten maximalen Vereisung vor rund 130.000 Jahren kam es zum sekundären Kontakt zweier Felsengänsekressen-Arten mit genetischer Durchmischung und Verdopplung des Erbgutes – die Vereisung hatte die Einzelareale der Arten in unmittelbare räumliche Nähe gerückt und die Areale vom Bergland weg in das Hügelland verschoben. In der darauf folgenden Zwischeneiszeit konnten sich die beiden ursprünglichen Arten wieder ausbreiten. Der neu entstandene Hybrid aber verblieb wohl im Areal und besiedelte während der letzten Vereisung seine eigenen, von den Elternarten getrennten Areale. Erst mit der letzten

„Es sind vor allem die Vervielfachungen des Erbgutes mit dauernder Durchmischung, die es bei gravierenden klimatischen Veränderungen immer wieder erlauben, erfolgreich Anpassungsprozesse zu durchlaufen.“

Warmzeit ist der Hybrid aus dem Alpenvorland ausgewandert – der erfolgte Genfluss hat zwischenzeitlich neue Eigenschaften zur Ausprägung kommen lassen. Die neue polyploide Art mit mehrfachem Chromosomensatz wanderte aus den kühlen und feuchten Kalk-Alpen in das warme und trockene Donautal. Dieses Beispiel zeigt zweierlei: Der gesamte Artbildungsprozess kann nicht nur sehr lange dauern, es lässt sich auch nicht vorherbestimmen, wohin die Reise – im wahrsten Sinne des Wortes – geht.

Andere Szenarien sind genau andersherum zu denken. Schon vor Jahren haben wir die eiszeitlichen Refugialareale des Ginkgobaumes in China aufzeigen können. Obwohl der Ginkgo ein lebendes Fossil ist, reicht der Stammbaum der heute lebenden Verwandten „nur“ 390.000 Jahre zurück. Es muss seinerzeit eine sehr starke genetische Verarmung stattgefunden haben. Vereisungen waren hierfür weniger der Grund. Stattdessen sind wohl Waldtypen-Vertreter einschließlich des Ginkgobaumes bei steigenden Temperaturen, also in den Warmzeiten, in die Berge aufgestiegen. In den Kaltzeiten breitete sich die gesamte Vegetation wieder weit in den tieferen Lagen aus. Unsere molekulargenetischen Daten legen nahe, dass sich dieses Muster in den vergangenen vier Kaltzeiten mehrfach wiederholt hat. Der Ginkgo hat sich dabei aber nicht weiter diversifiziert, was vor allem an seiner genetischen Einförmigkeit liegen mag.

COS: Von Molekülen zu lebenden Systemen

Das Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg ist das größte lebenswissenschaftliche Forschungszentrum an der Universität Heidelberg. Ziel der Wissenschaftler am COS ist es, die komplexen biologischen Mechanismen lebender Systeme über alle Größenskalen und Organisationsstufen hinweg zu erforschen: von der molekularen Analyse über die Ebene der Zelle bis hin zur Gesamtheit eines Organismus im Kontext mit seiner Umwelt. 2010 wurde das Zentrum aus einem Zusammenschluss der beiden Heidelberger Institute für Zoologie und Pflanzenwissenschaften gegründet; es gehört zu den zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität.

Das COS besteht derzeit aus 16 Abteilungen und acht unabhängigen Nachwuchsgruppen. Insgesamt arbeiten hier aktuell 46 Forschungsgruppen mit rund 350 Mitarbeitern; sie alle leisten wichtige Beiträge in der Grundlagenforschung und in der Lehre. Der Botanische Garten Heidelberg ist mit einer eigenen Organisationsstruktur ebenfalls am COS eingebunden.

www.cos.uni-heidelberg.de

THE BIRTH AND DEATH OF SPECIES

BIODIVERSITY IN GLACIAL AND INTERGLACIAL PERIODS

MARCUS KOCH

Globally, many more species are currently disappearing than new species are emerging. We are witnessing not just a dramatic level of species extinction, but also an ongoing loss of absolute biodiversity. New species develop most often in response to drastic changes in environmental conditions. What are the options for survival in the face of such changes, for instance during an ice age? What is the temporal and spatial context in which new species are born? These are questions that we address primarily by decoding the information in the genome. By reconstructing the environmental parameters of past ages and using data from various environmental archives, we can today investigate evolutionary processes of species formation with unique, high-resolution methods and test our findings in specially designed experiments.

Our research team in Heidelberg is developing the evolutionary model system of the crucifers (Brassicaceae) – a plant family that encompasses 4,000 species, including the various forms of cabbage. Brassicaceae are the standard model for basic molecular biological plant research. Our comprehensive investigation traces their evolution from the beginning of their diversification more than 30 million years ago. What allowed these plants to successfully adapt time and again to dramatic climate changes was the multiplication and constant mixing of their genome.

Environmental factors like cooling and drought played a central role in the evolution of the Brassicaceae family. The continual changes between warm and cold periods over the last 2.6 million years provided the spatial and temporal dynamics for a continuously high rate of species formation. At the same time, Brassicaceae were unable to populate warm and humid tropical or subtropical regions – their evolutionary past may thus place limits on possible future adaptations. ●

**“The evolutionary
past has consequences
for the future.”**

PROF. DR MARCUS A. KOCH has been heading the Biodiversity and Plant Systematics research group at the Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg since 2003, whose founding director and current managing director he is. He also heads the Biodiversity research unit and is the director of the botanical garden and herbarium of Heidelberg University, founding board member and current deputy director of the Heidelberg Center for the Environment (HCE) and a former fellow of the Marsilius Kolleg. Before his transfer to Heidelberg, Marcus Koch held positions at Max Planck Institutes in Cologne and Jena and at the University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna (Austria) from 1995 to 2002. His research interests focus primarily on the intersection points of biodiversity and evolutionary research.

Contact: marcus.koch@cos.uni-heidelberg.de

„Die evolutionäre Vergangenheit hat Konsequenzen für die Zukunft.“

Forschungsstelle Biodiversität

Die Forschungsstelle Biodiversität an der Universität Heidelberg sieht sich der Erforschung der vielfältigen Facetten der biologischen Vielfalt verpflichtet. In besonderer Weise werden hier horizontale und vertikale Zeitachsen bearbeitet – die gegenwärtige sowie die ausgestorbene und zukünftige biologische Vielfalt. Ziel ist eine fächerübergreifende Bearbeitung verschiedener Themen der Biodiversität mit Schwerpunkten in der Paläobiologie, der Evolutions- und Biodiversitätsforschung sowie der physischen Geographie mit dem Schwerpunkt auf Naturräumen. Die bearbeiteten Fragestellungen reichen von reiner Grundlagenforschung in der Evolutionsbiologie bis hin zur Entwicklung konkreter Handlungsstrategien etwa im Natur- und Artenschutz.

www.biodiversity.uni-heidelberg.de

Motor der Artbildung

Damit neue Arten entstehen können, braucht es Zeit und Raum. Als ein Motor der Artbildung kann Klimawandel ganz generell – insbesondere aber der Wechsel von warmen und kalten Zeiten – betrachtet werden. Dieser Prozess braucht in der Regel Zehntausende von Jahren.

Der derzeit sehr rasche Anstieg der Temperaturen und der damit verbundene sehr schnelle Klima- und Umweltwandel machen es Pflanzen schwer, schnell genug auf die veränderten Bedingungen zu reagieren. Hinzu kommt, dass der dafür nötige Raum oft nicht vorhanden ist – oder parallel stark verändert wird, beispielsweise über den hohen landwirtschaftlichen Eintrag von Stickstoff. Für stabile Ökosysteme aber ist die biologische Vielfalt unabdingbar. Da zu befürchten ist, dass die Artenzahlen auch weiterhin abnehmen, müssen wir alles daransetzen, das Ausmaß des Artensterbens einzudämmen oder gar zu stoppen. Die Grundlagenforschung indes gibt wenig Anlass zu der Hoffnung, dass ausgestorbene Arten rasch durch neue Arten ersetzt werden. ●