

Axel Lange

# Evolutionstheorie im Wandel

Ist Darwin überholt?

SACHBUCH

 Springer



# 4

## Ausgewählte Evo-Devo-Forschungsergebnisse

Im letzten Kapitel haben Sie erfahren, was die evolutionäre Entwicklung ist. Sie haben über Genregulation gelesen, über die Rolle der Zellen bei der erleichterten Variation und über die Rolle der Umwelt beim Entstehen phänotypischer Plastizität und Innovation. In diesem Kapitel stelle ich nun eine Auswahl an empirischen Evo-Devo-Forschungsleistungen vor. Darunter sind solche, die ziemlich gut mit Genregulierungen erklärbar sind, etwa die Größe bunter Augenflecken auf Schmetterlingsflügeln. Andere Beispiele, etwa ein zusätzlicher Finger, gehören zu Evo-Devo-Prozessen einer höheren Ebene. In diesem Zusammenhang werden wir Selbstorganisation auf der Ebene von Zellen kennen lernen. In der Regel sind zweidimensionale Farb- oder Strukturmuster leichter zu erklären als dreidimensionale Muster, wie zusätzliche Finger, Vogelschnäbel oder Kopfformen von Buntbarschen. Der Schwerpunkt der Auswahl liegt hier bewusst auf Themen, bei denen das neodarwinistische Evolutionsmodell in Schwierigkeiten gerät, weil Erklärungen fehlen. Aus den Fällen ergeben sich andere Vorhersagen als aus der Synthetischen Theorie, wie etwa diskontinuierliche Vererbung, Variationstendenz (*Bias*) der Entwicklung und andere. Mit diesen Beispielen wird die zuvor vorgestellte epigenetisch-systemische Evo-Devo-Theorie gestützt – und hoffentlich noch deutlicher, worum es in der Erweiterten Synthese in der Evolutionstheorie in Kap. 6 geht.

**Wichtige Fachbegriffe in diesem Kapitel** (s. Glossar): diskontinuierliche Variation, Emergenz, Entwicklungsconstraint, Entwicklungsplastizität, Evo-Devo, Evolvierbarkeit, genetische Akkommodation, genetische

Assimilation, Hox-Gene, Kanalisierung, Morphogen, Polydaktylie, Punktmutation, Schwelleneffekt, Selbstorganisation, Turingsystem Variationstendenz (*Bias*), Zellsignale.

## 4.1 Schnäbel nach Bedarf bei Darwinfinken

Peter und Rosemary Grant haben bei Darwinfinkenarten auf den Galápagos-Inseln Erstaunliches nachgewiesen. Es braucht nämlich bei verändertem Nahrungsangebot nur wenige Generationen, bis es zu einer deutlichen Umbildung der Vogelschnäbel kommt (Abb. 4.1). Das Ehepaar Grant hatte sich 33 Jahre lang auf den Inseln mit den Darwinfinken beschäftigt. Eine phänotypische Variation in dem von den Grants entdeckten Umfang galt bis dahin in so kurzer Zeit als unmöglich. Die Schnabelformen einer Population der Gattung *Geospiza* entwickeln sich manchmal schnell in unterschiedliche Richtungen, etwa wenn sich zwei Arten auf einer Insel das Nahrungsangebot teilen müssen und sich dabei auf große bzw. kleine



**Abb. 4.1 Schnabelform bei Darwinfinken.** Darwinfinken sorgten für eine Überraschung: Einige können ihre Schnabelform und -größe in wenigen Generationen an ein verändertes Nahrungsangebot anpassen. Hier verschiedene Gattungen. Die Messungen wurden an Individuen der Gattung *Geospiza* (ob.) vorgenommen

Samenkörner spezialisieren (Abzhanov et al. 2004). Dabei ist zu bedenken, dass die Variation der Schnabelgröße und -form gleichzeitig eine (wenn auch nur um wenige Millimeter) veränderte Einpassung des Hornschnabels in die Schädelknochen erfordert, denn der Kopf des Finken wächst nicht in dem Umfang mit wie der Schnabel. Die Proportionen ändern sich, und damit ist überdies die Anpassung der Speiseröhre ebenso erforderlich wie die der Luftröhre und die der Zunge. Alle diese Teile müssen penibel aufeinander abgestimmt variieren.

Man konnte ein Wachstumsfaktor-Protein identifizieren, das an der Schnabelbildung im Embryo maßgeblich beteiligt ist. Ferner konnte gezeigt werden, dass dieses Protein bei verschiedenen Schnabelformen entsprechend unterschiedlich stark oder unterschiedlich lange ausgebildet wird. Kirschner und Gerhart erwähnen zudem, dass besagtes Protein – es heißt *BMP4* und wird beim Embryo in Neuralleistenzellen produziert – experimentell in die Neuralleiste von Hühnerembryonen eingepflanzt wurde, worauf sich erwartungsgemäß die Schnabelform veränderte. Die Hühnchen entwickelten breitere und größere Schnäbel als normal. Andere Wachstumsfaktoren haben nicht diese Wirkung. Obgleich also der experimentell manipulierte Schnabel seine Größe bzw. Form ändert, wird er dennoch in die Anatomie des Vogelkopfes integriert: „Es kommt nicht zu einer monströsen Fehlentwicklung“ (Kirschner und Gerhart 2007).

Die Schnabelbildung ist ein komplexer Entwicklungsprozess, an dem fünf Nester von Neuralleistenzellen beteiligt sind. Die Neuralleiste ist die frühe embryonale Anlage, aus der unter anderem das periphere Nervensystem entsteht. Die Nester empfangen Signale von Gesichtszellen und reagieren auf diese. Daher verändern Merkmale, die die Neuralleistenzellen beeinflussen, das Schnabelwachstum in koordinierter Weise. Die neodarwinistische Evolutionstheorie müsste an diesem und anderen Beispielen plausibel erklären können, wie in nur wenigen Generationen allein durch die Abfolge von zufälliger Mutation und Selektion eine derartig umfangreiche, koordinierte, phänotypische Variation entstehen kann, die tatsächlich eines wechselseitigen Zusammenspiels vieler Entwicklungsparameter bedarf.

Kirschner und Gerhart nennen diesen Vorgang erleichterte Variation (Abschn. 3.5). Variation kann demnach nicht x-beliebig sein. Vielmehr „bedingt erleichterte Variation einen beeinflussten, vorsortierten Output phänotypischer Variation durch einen Organismus“. Vieles spricht dafür, dass es Entwicklungswege für eine koordinierte Entwicklung von Schnabel und Kopf gibt – eine funktionale, integrierte Anpassungsfähigkeit des Organismus, die zufallsverteilte Mutationen in nicht zufällig verteilte phänotypische Variation übersetzt.

Das Evo-Devo-Beispiel hat folgende Wirkungsweise: Eine kleine Ursache (eine oder ein paar quantitative, regulatorische Proteinänderungen) hat eine große Wirkung (funktionale Veränderung der Schnabelform), gesteuert durch epigenetische Prozesse der Entwicklung, insbesondere ein breites adaptives Zellverhalten der Neuralleistenzellen des Schnabels und des Gesichtsumfelds. Anhand von Erkenntnissen zur gut erforschten Entwicklung des Schnabels und seiner Modifikationen kann geschlossen werden, dass sich „recht umfangreiche Veränderungen der Schnabelgröße und Schnabelform mit ein paar regulatorischen Mutationen eher erreichen lassen als mit einer Summierung von langen Folgen kleiner Veränderungen“ (Kirschner und Gerhart 2007).

Nicht erforscht ist in diesem Beispiel, wodurch die Veränderungen des *BMP4*-Spiegels in der Entwicklung ausgelöst werden. Eine Möglichkeit sind genetische Zufallsmutationen; wahrscheinlicher sind jedoch Reaktionswege der Entwicklung auf den Stress der Tiere, der durch die anhaltende Veränderung des Nahrungsangebots entsteht, also ein äußerer Faktor.

## 4.2 Experiment 1: Spaziergang der Flösselhechte

Fische können an Land laufen. Das glauben Sie nicht? Hier erfahren Sie, wie die Tiere es lernen. In einem achtmonatigen Versuch mit juvenilen Flösselhechten (*Polypterus senegalus*) aus dem tropischen Afrika eruierte die Kanadierin Emily Standen 2014 erstmals, wie gut sich diese Fische an die Bedingungen an Land anpassen, wenn man ihnen die aquatische Lebensweise vollständig entzieht (Standen et al. 2014; Abb. 4.2). Flösselhechte besitzen eine primitive Lunge und können grundsätzlich an Land watscheln. Im Versuch ging es jedoch darum, wie sie ihre „Land-Gangart“ verbessern können. Dabei zeigte sich, dass sich die Tiere überraschend schnell an die neuen Bedingungen anpassen konnten. Der „trainierte“ Fisch hebt seinen Kopf an Land höher, setzt die Bewegung der Flossen effizienter ein und rutscht seltener aus. Die Versuchstiere überlebten nicht nur, sondern blühten in der neuen Umgebung regelrecht auf. Ihre Anpassungen umfassten sowohl Änderungen der Muskulatur also auch der Knochenstruktur. Die Versuchstiere konnten viel besser auf dem Trockenen laufen als die aquatischen Kontrolltiere. Für Evolutionsbiologen der evolutionären Entwicklungsbiologie erlaubt diese unerwartet hohe Entwicklungsplastizität Rückschlüsse darauf, wie die ersten Meeresbewohner, etwa der *Tiktaalik*,



**Abb. 4.2 Flösselhecht zu Fuß unterwegs.** Ein afrikanischer Flösselhecht watschelt im Laborversuch auf dem Trockenen. Anpassungen von Muskeln und Knochenstruktur erfolgten in kurzer Zeit. Das Experiment sollte Erkenntnisse darüber ermöglichen, ob der Landgang der Fische vor 400 Mio. Jahren durch phänotypische Änderungen erfolgen konnte, die womöglich erst später genetisch akkommodiert wurden

vor 400 Mio. Jahren an Land gingen und mit dem Übergang von Flossen zu Extremitäten allmählich Amphibien entstehen konnten. In der Tat spiegeln die hier beobachteten Knochenvariationen Veränderungen wider, wie man sie bei Fossilien beobachtet, die den Landgang der Wirbeltiere dokumentieren.

Dieser Versuch mit Flösselhechten bestätigte für den Landgang einen evolutionär wichtigen Systemübergang, die Hypothese, dass Tiere in evolutionär kürzester Zeit (manchmal innerhalb einer einzigen Generation) sowohl ihre Anatomie als auch ihr Verhalten in Reaktion auf Umweltänderungen plastisch anpassen können (Standen et al. 2014). Genetische Mutationen könnten langfristig die durch die neue Umweltsituation geschaffenen Bedingungen entgegenkommen und für geeignete Vererbung sorgen. Der evolutionäre Ablauf, so die Argumentation, ist demnach: nicht-genetische Mutation  $\Rightarrow$  Umweltdruck  $\Rightarrow$  natürliche Selektion  $\Rightarrow$  Adaptation in der Population, sondern: Veränderung der Umweltbedingungen  $\Rightarrow$  dauerhafte, noch umweltabhängige und nicht-genetisch vererbte phänotypische Adaptation  $\Rightarrow$  unterstützende genetische (Mutationen für die Akkommodation)/Assimilation  $\Rightarrow$  genetische Vererbung.