



Axel Lange

# Evolutionstheorie im Wandel

Ist Darwin überholt?

*2. Auflage*

SACHBUCH

 Springer

# Evolutionstheorie im Wandel

Axel Lange

# Evolutionstheorie im Wandel

Ist Darwin überholt?

2., aktualisierte Auflage

 Springer

Axel Lange  
Taufkirchen bei München, Deutschland

ISBN 978-3-662-68961-5      ISBN 978-3-662-68962-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68962-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2020, 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

© QOLORLY.com/Generated with AI/Stock.adobe.com

Planung/Lektorat: Stefanie Wolf  
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

*Es wäre wirklich sehr seltsam zu glauben, dass alles in der lebenden Welt ein Produkt der Evolution sei mit Ausnahme einer Sache – dem Prozess der Erzeugung neuer Variation*

Eva Jablonka und Marion J. Lamb

*Wir müssen uns daran erinnern, dass das, was wir beobachten, nicht die Natur selbst ist, sondern Natur, die unserer Art der Fragestellung ausgesetzt ist*

Werner Heisenberg

*Ein Insekt ist komplexer als ein Stern*

Martin Rees

*Für Yano, meinen Enkel.*

*Wir haben vergessen, dass wir Teil der Natur sind und nur mit ihr leben können. Jedes Wesen, auch das Kleinste, ist mit Dir verwandt. Deine Generation kann es besser machen als wir. Achte darauf, allem Leben seine Würde zu geben. Mach es Dir zur Aufgabe. Jeden Tag. Dein Leben lang. Taufkirchen/Wien, am Tag Deiner Geburt, 22. Mai 2024*

## Einführung zur 2. aktualisierten Ausgabe

Vier Jahre nach der ersten Ausgabe ist dieses Buch noch immer das einzige in deutscher Sprache, das eine Gesamtschau neuer wissenschaftlicher Sichten auf die Evolutionstheorie bereitstellt: die Erweiterte Synthese der Evolutionstheorie. Alle Kapitel wurden für diese Ausgabe auf den neuesten Stand gebracht. Leider vermitteln Abiturse, Universitätsvorlesungen zur Evolutionsbiologie und viele Wikipedia-Artikel die Evolutionstheorie im deutschsprachigen Raum nach wie vor so, als sei seit Jahrzehnten nichts geschehen. Natürlich gibt es auch in unserem Land Weitblickende in der Evolutionsbiologie, doch kaum jemanden in der Theorie. Tatsächlich ist hier im angloamerikanischen Raum in den vergangenen 40 Jahren Erstaunliches geschehen, das ich vorstelle. Verpassen wir womöglich gerade den Anschluss?

Noch deutlicher als die erste Auflage vermitteln die aktualisierten Inhalte in diesem Band das starke Um- und Neudenken in der Evolutionstheorie. Als Leser dieser Ausgabe erhalten Sie eine historische Einführung in die Evolutionstheorie, und werden mit den offenen Fragen der Standardtheorie, also der Synthetischen Theorie, konfrontiert. Schritt für Schritt schaffen Sie sich dann ihr eigenes Bild davon, was das Neue, die Erweiterte Synthese, im Kern ausmacht. Sie sieht kritisch auf die Grundannahmen der Standardtheorie. Dazu gehören die zentrale Ausrichtung der Synthetischen Theorie an der Genetik mit zufälliger Mutation als *dem* Grund phänotypischer Variation oder die Einengung von Evolution auf sich addierende, kleinste Änderungen. Wenn Sie zudem der Meinung sind, Gene seien die alleinigen Träger der Vererbung, wird ihr Weltbild in allen diesen Punkten gehörig ins Wanken kommen.

Sie erfahren, wie die evolutionäre Entwicklungsbiologie (Evo-Devo) herausfindet, welche konstruktiven Mechanismen die embryonale Entwicklung für Veränderungen in der Evolution bereitstellt, und zwar auf allen biologischen Ebenen. Evolutionäres Geschehen bekommt ein neues Gesicht, das Gesicht innerer Fähigkeiten des Embryos, der seine eigene Gestalt formt und auch neue Variationen findet. Was bedeutet es für die Theorie, dass Arten ihre Umwelt selbst konstruieren, etwa Biber mit ihren Bauten, aber auch Vögel mit kunstvollen Nestern, in denen ihre Jungen heranwachsen? Allen voran verändern wir Menschen kulturell die Welt. Der Umbau der Natur durch uns selbst bestimmt unsere eigene Evolution. Mehr noch: Wir bestimmen unsere Evolution durch kulturelle Nischen in Medizin und Hightech, künstlicher Intelligenz und Robotik. Alles was wir tun wirkt evolutionär wieder auf uns und auf zahllose andere Arten zurück. Diese Sicht, die Nischenkonstruktionstheorie hat Umwälzendes zur Evolutionstheorie im Gepäck, nicht zuletzt für unsere eigene evolutionäre Zukunft.

Dieses Buch habe ich für Biologen oder Nichtbiologen geschrieben, für Schüler und Erwachsene, Lehrende und Neugierige. Wenn Sie interessiert daran sind, über den Tellerrand hinauszuschauen, offen sind für Neues, dann lade ich Sie ein, in die moderne Wissenschaft der Evolution einzutauchen. Ich stelle Ihnen manche kniffligen Zusammenhänge (hoffentlich) verständlich dar und erkläre unvermeidbare Fachbegriffe. Alle wichtigen Begriffe werden zudem am Beginn jedes Kapitels aufgelistet; so können Sie sich, wenn Sie das möchten, vorab im Glossar ein wenig mit ihnen vertraut machen. Natürlich kommt in einigen Abschnitten das genetische Zusammenspiel vor. Lassen Sie sich dadurch nicht vom Weiterlesen abbringen – ganz im Gegenteil, Sie dürfen auch gern einmal etwas überspringen. Ich habe mit Absicht auch an manchen Stellen die sachliche Schilderung aufgebrochen und bringe meine Erfahrungen ins Spiel oder spreche Sie als Leser im Text an. Für Sie sind es Atempausen beim Lesen.

Ich lasse Evolutionsbiologen der ganzen Welt zu Ihnen sprechen. Am Ende können Sie sich Ihre eigene Meinung darüber bilden, wie Evolution aus Sicht des 21. Jahrhunderts funktioniert. Aber ich hoffe natürlich, Sie mit meiner Begeisterung für das Studium neu entdeckter Mechanismen der Evolution anstecken zu können! Ich erlebte das Entstehen der Erweiterten Synthese mit, traf führende Forscher der Welt, diskutierte mit ihnen und schrieb eine Dissertation über ein atemberaubendes Evo-Devo-Thema. Oder wussten Sie etwa schon, wie zusätzliche Finger entstehen können? Darwin wusste es jedenfalls noch nicht und hatte seine Mühen damit. Hier erfahren Sie es. Sie werden die Evolution neu betrachten, mit den Augen von Menschen des 21. Jahrhunderts.



Wen immer ich als „Leser“ anspreche, als Biologe meine ich natürlich Sie als Mann oder Frau oder Leser jedes anderen Genders. Das ist selbstverständlich. Zitierte Übersetzungen sind, soweit in den Quellen nicht anders vermerkt, vom Autor. Das Motto von Eva Jablonka ist aus ihrem Buch *Evolution in vier Dimensionen*, Hirzel 2017. Das Motto von Werner Heisenberg entstammt dem Band *Physik und Philosophie*, Hirzel 2000. Das Motto des Astronomen Martin Rees findet man auf [wisefamousquotes.com](http://wisefamousquotes.com), übersetzt vom Autor.

Viel Vergnügen!

Axel Lange  
[axel-lange@web.de](mailto:axel-lange@web.de)  
Taufkirchen bei München im Mai 2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Darwins Jahrtausendidee und Batesons Gegenmodell</b>	1
1.1 Charles Darwins Theorie und ihre Bedeutung	2
1.2 William Batesons Gegenmodell	10
1.3 Die Zeit nach Darwin	15
1.4 Zusammenfassung	18
Literatur	19
<b>2 Die Modern Synthesis – das Standardmodell der Evolution</b>	21
2.1 Entstehen und Kernaussagen	21
2.2 Variation – Selektion – Anpassung: die Praxis	29
2.3 Weitere Erkenntnisse bis 1980	35
2.4 Zusammenfassung	41
Literatur	43
<b>3 Evo-Devo – das Beste aus zwei Welten</b>	45
3.1 Conrad Hal Waddington – Epigenetiker und Evo-Devo-Vorläufer	46
3.2 Evo-Devo – Geschichte und frühe Schwerpunkte	50
3.3 Genregulationsnetzwerke	61
3.4 Systemisch-interdisziplinäre Sicht – Eine Forschungsdisziplin bekommt Ordnung	69
3.5 Erleichterte Variation – die Perspektive der Zellen	78
3.6 Vererbung ist viel mehr als Mendel und Gene: inklusive Vererbung	90
3.7 Die Musik des Lebens	100

3.8	Plastizität des Phänotyps und genetische Assimilation: <i>Genes are followers</i>	112
3.9	Natural genetic engineering	130
3.10	Innovationen in der Evolution	139
3.11	Zusammenfassung	151
	Literatur	154
<b>4</b>	<b>Ausgewählte Evo-Devo-Forschungsergebnisse</b>	<b>161</b>
4.1	Schnäbel nach Bedarf bei Darwinfinken	162
4.2	Experiment 1: Spaziergang der Flösselhechte	165
4.3	Von Buntbarschen mit dicken Lippen und großen Beulen	166
4.4	Experiment 2: Schmetterlinge mit Augen auf den Flügeln	168
4.5	Experiment 3: Tabakswärmer mit nachträglicher genetischer Assimilation	174
4.6	Der fast nicht konstruierbare Schildkrötenpanzer	175
4.7	Wie viele Beine haben Tausendfüßer?	178
4.8	Finger in der Überzahl	181
4.9	Zusammenfassung und Ausblick	203
	Literatur	205
<b>5</b>	<b>Die Theorie der Nischenkonstruktion</b>	<b>209</b>
5.1	Ein eigener evolutionärer Mechanismus	210
5.2	Entwicklungs-Nischenkonstruktion – Burgen und Schlösser für die Nachkommen	221
5.3	Nischenkonstruktionen des Menschen	222
5.4	Gibt es eine Bruchlinie zur Modern Synthesis?	228
5.5	Wann ist eine Theorie eine neue Theorie?	230
5.6	Zusammenfassung	233
	Literatur	234
<b>6</b>	<b>Die Erweiterte Synthese der Evolutionstheorie</b>	<b>237</b>
6.1	Das Zustandekommen des EES-Projekts	238
6.2	Ziele des EES-Projekts	239
6.3	Neue Vorhersagen über die Evolution	241
6.4	Kurzbeschreibung der einzelnen Forschungsprojekte	241
6.5	Ein Projekt über die EES hinaus: Handlungsinstanzen in lebenden Systemen	254
6.6	Zusammenfassung	257
	Literatur	260

<b>7 Die Evolution des Menschen in seiner (nicht-)biologischen Zukunft</b>	267
7.1 Transhumanismus – Der Mensch übernimmt die Regie für seine Evolution	268
7.2 Künstliche Intelligenz in der Evolution	291
7.3 Die Evolutionstheorie in der Techno- und soziokulturellen Sphäre	310
7.4 Zusammenfassung	329
Literatur	330
<b>8 Wie viele Evolutionstheorien?</b>	337
8.1 Von alten zu neuen Ufern – Hindernisse und Chancen	338
8.2 Evolution aus zwei unterschiedlichen Perspektiven	339
8.3 Zusammenfassung und Ausblick: Für einen theoretischen Pluralismus	342
Literatur	345
<b>9 Die Player des neuen Denkens in der Evolutionstheorie</b>	347
<b>Abbildungsnachweis</b>	363
<b>Glossar</b>	367
<b>Personen- und Sachindex</b>	397

# Über den Autor



**Axel Lange** machte Abitur am Jesuitenkolleg St. Blasien im Schwarzwald. Danach studierte er Wirtschaftswissenschaften und Philosophie an der Universität Freiburg. Beruflich arbeitete er im Vertriebs- und Marketingmanagement in der IT, bevor sein tiefes Interesse an der Evolutionstheorie ihn veranlasste, sich in der Biologie völlig neu zu orientieren. Langes 2012 erschienenes erstes Buch über Evo-Devo und die Erweiterung der Synthetischen Evolutionstheorie lieferte die Grundlage dafür, dass die Universität Wien einen Dissertationsvertrag mit ihm abschloss. Am dortigen Department für Theoretische Biologie studierte Lange Biologie und forschte über die evolutionäre Extremitätenentwicklung der Wirbeltiere und – der evolutionäre Gesichtspunkt – über Polydaktylie, das ist die Ausbildung überzähliger Finger und Zehen bei Neugeborenen. Ein neuer Finger hat tausende Knochen-, Nerven-, Muskel, Haut- und Blutgefäßzellen; dennoch erscheinen mehrere solcher Finger und Zehen funktionsfähig nicht selten in einer einzigen

Generation im Embryo neu und vererben sich sogar in unterschiedlicher Zahl weiter. Die Standard-Evolutionstheorie kann die Mechanismen hierfür nicht erklären. Wie entsteht dieser Phänotyp also? Diese Frage beschäftigte Lange. Seine Veröffentlichung mit Gerd. B. Müller über das Wissen der Menschheit zu Polydaktylie in Entwicklung, Vererbung und Evolution, vom Altertum bis heute, erschien im März 2017 im traditionsreichen amerikanischen Journal *The Quarterly Review of Biology*. Weitere Publikationen befassen sich mit der Selbstorganisationsfähigkeit der Extremität bei gleichzeitiger Variation der Fingerzahlen im Modell.

Der 2018 mit Auszeichnung zum PhD promovierte Biologe hält Vorträge über komplexe, epigenetische Evo-Devo-Prozesse im In- und Ausland. Auch die (nicht-)biologische Zukunft menschlicher Evolution ist ein bevorzugtes Vortragsthema von ihm. Im Rahmen des Studiums der Erweiterten Synthese der Evolutionsbiologie lernte Lange international angesehene Forscher persönlich kennen. Er liebt die Berge, spielt leidenschaftlich gern romantische Klaviermusik und lebt als Autor und Wissenschaftspublizist im Süden von München. Lange hat drei erwachsene Kinder und einen Enkel.



# 1

## Darwins Jahrtausendidee und Batesons Gegenmodell

Charles Darwin (1809–1882) war nicht der Erste, der den Gedanken hatte, dass das Leben auf der Erde Wandlungsprozesse durchmacht. Aber er war der Erste, der einen Mechanismus für evolutionäre Veränderungen vorstellte, den Selektionsmechanismus. Auch war er der erste, der zahlreiche empirische Beispiele heranzog, besonders auch solche von Zuchttieren. Für sein Werk wurde er zuerst verspottet und schließlich gerühmt. Heute gilt Darwin zu Recht als einer der leuchtenden Sterne menschlichen Denkens. – Seit der Vorstellung seiner epochalen Theorie der Evolution allen Lebens sind 160 Jahre vergangen. Doch während man in den Medien heute über die Astronomie, Genetik oder Quantenphysik ständig Neues liest oder hört, gewinnt man in der Evolutionstheorie eher das Gefühl, seit der Zusammenführung von Darwin, Mendel und der Genetik, der Synthese, hätte sich nichts mehr getan. Meist werden in der Öffentlichkeit nur Darwins Grundideen von zufälliger Mutation und natürlicher Selektion wiedergegeben, ganz so, als hätte sich seine Theorie nicht wesentlich weiterentwickelt. Dem ist jedoch nicht so, und genau das soll in diesem Buch aufgeblättert werden.

**Wichtige Fachbegriffe in diesem Kapitel** (s. Glossar): Anpassung, Fitness, Gen, Gradualismus kontinuierliche und diskontinuierliche Variation, natürliche Selektion, Phänotyp, Saltationismus, *Survival of the Fittest*, Weismann-Barriere.

## 1.1 Charles Darwins Theorie und ihre Bedeutung

Darwins berühmtes Buch *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* (deutsch *Die Entstehung der Arten*) war bekanntlich 1859 nur einen Tag nach seinem Erscheinen ausverkauft. Sein zwölf Jahre später erschienenes Buch *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex* (deutsch *Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl*, (Darwin 1871)) erregte schon kaum mehr großes Aufsehen. Man spottete über ihn und machte den Mann, der unsere Abstammung von der gemeinsamen Lebensursprünge mit den Menschenaffen herleitete, zum Affen.

Darwins *Opus magnum* ist ein dicker Brocken (Darwin 1859). Die Wenigsten, die über Evolutionstheorie schreiben, haben wohl das Buch vollständig gelesen. Man spürt bei der Lektüre förmlich das Bemühen des Autors, seine Hypothese der natürlichen Selektion auf stabile Beine zu stellen. Dazu zieht er Zuchttiere heran, Tauben, Hunde, Katzen, Enten. An ihrem Beispiel zeigt er eindrucksvoll, wie es dem Menschen durch künstliche Selektion gelingt, Arten zu variieren. Nachdem er das Prinzip der künstlichen Zuchtwahl durch den Menschen veranschaulicht hat, schlägt Darwin den Bogen zur natürlichen Zuchtwahl oder natürlichen Selektion, wie wir heute sagen. Die Natur selektiert ohne das Zutun des Menschen oder einer anderen Instanz. Die Entdeckung der natürlichen Selektion ist somit der zentrale Mechanismus der Evolution und kann als Mittelpunkt der Evolutionstheorie Darwins betrachtet werden. Wir sprechen auch von der Selektionstheorie. Um ihre Wirkweise und kritische Sicht auf sie geht es in diesem Buch.

Aber Darwin hat noch mehr herausgefunden. Betrachten wir daher in aller Kürze und der Reihe nach die zentralen Thesen, aus denen seine Theorie besteht. Wir verdichten die 490 Seiten der ersten Ausgabe von 1859 dabei auf eine einzige Seite. Sie sollen als Leser ja hier nicht ein Buch lesen, das Darwin umfassend schildert (davon gibt es schon so einige), um dann am Ende ein paar Zusätze und offen gebliebene Fragen zu diskutieren. Es geht hier vielmehr darum, wie Darwins Theorie und vor allem die Theorie seiner Nachfolger, die heutige Standardtheorie, um wichtige Argumente erweitert und in Grundannahmen auch überwunden werden können.

### Mindestens drei Theorien in einer

Fassen wir also zusammen: Darwin beobachtete (oder übernahm von früheren Forschern), dass bei vielen Arten große Fruchtbarkeit, gleichzeitig aber



ein begrenztes Nahrungsangebot existiert, während die Größe der Population von Arten stabil bleibt und nicht „explodiert“. Seine erste theoretische Schlussfolgerung daraus ist: Es muss zu Auseinandersetzungen der Individuen einer Population um die Lebensgrundlagen kommen. Von Auseinandersetzungen hatte man zwar schon vor Darwin gesprochen, aber nur zwischen unterschiedlichen Arten, nicht jedoch zwischen den Individuen innerhalb einer Art. Darwins Freund, der Geologe Charles Lyell, stellte sich beispielsweise vor, dass Arten nicht nur aussterben, sondern einander verdrängen. Eine Art könnte demnach nur auf Kosten einer anderen Art Raum gewinnen. Gleichgewichte in der Natur variierten auf diese Art labil.

Darwin analysierte weiter scharf: Es gibt unzählige individuelle Unterschiede in einer Population. Keine zwei Individuen sind sich in allen Merkmalen gleich. Solche individuellen Unterschiede – Variationen, wie er sie nannte – sind erstens erblich und zweitens klein. Sie summieren sich oder kumulieren langsam in diesen kleinen Schritten über viele Generationen hinweg zu größeren, sichtbaren Variationen. So entstanden etwa die höchst unterschiedlichen Extremitätenformen der Wirbeltiere. Heute spricht man in diesem Zusammenhang von Gradualismus; ein wichtiger Begriff, den wir später oft aufgreifen werden und der die moderne Kritik an der Evolutionstheorie maßgeblich mitbestimmt. Die zweite, zentrale theoretische Folgerung Darwins aus dem Beobachteten: Für alle Arten existiert wegen ihrer hohen Fruchtbarkeit ein natürlicher Selektionsprozess. Das Überleben der Individuen einer Art in diesem Prozess der natürlichen Selektion ist davon abhängig, welche Variationen vererbt werden.

Darwins dritte theoretische Kernaussage schließlich lautete: Die natürliche Selektion führt zur erhöhten Nachkommenschaft der am besten Angepassten einer Art. Das ist das berühmte *Survival of the Fittest*, wie er es später nannte. Wenn die These der Auseinandersetzungen der Individuen einer Art gilt, dann gilt auch, dass günstige Abänderungen dazu neigen, erhalten zu bleiben und ungünstige dazu, wieder zu verschwinden. Die Fitness ist dann die Fähigkeit zur Weitergabe eigener, vorteilhafter Merkmale in der Population, und zwar unter den bestimmten Lebensbedingungen einer Population, nicht absolut. So viel zu Darwins Entdeckungen. Es gibt noch weitere.

Der komplexe Aufbau und die Funktionalität der Lebewesen sind nach dieser Theorie allein eine Folge natürlicher Vorgänge. Allein die natürliche Selektion ist der Hebel, der Mechanismus oder Prozess, der das evolutionäre Geschehen auf der Erde bestimmt. Das war die „Bombe“, die Darwin zündete. Später nahm er die sexuelle Selektion als ergänzenden Faktor oder Unterform der natürlichen Selektion hinzu. Ein bestechend faszinierendes



**Abb. 1.1 Angeberfisch.** Darwin orientierte sich stark an Züchtungen, als er seine Theorie entwickelte. Aus künstlicher Selektion leitete er die Wirkung der natürlichen Selektion ab. Hier ein Prachtexemplar eines Mollys (*Poecilia sphenops*). Die außergewöhnlich vergrößerte Schwanz- und Rückenflosse entstehen in heutigen Zuchtbetrieben durch natürliche Spontanmutationen und menschliches Auskreuzen. Bei den wildlebenden Populationen hat der Schwanz eine konstante, angepasste Größe und Form, da auf ihn als Hauptantriebsflosse starke natürliche Selektionskräfte wirken. Eine Ausnahme sind die Männchen des verwandten Schwertträgers (*Xiphophorus hellerii*), den Darwin bereits beschrieb. Im Aquarium, in dem die natürliche Selektion ausbleibt, kann die sexuelle Selektion stärker wirken. So können – wie im Bild – bei einem Männchen schon einmal auffällige, sekundäre Sexualmerkmale entstehen, die bei den Weibchen gut ankommen

Thema, wenn wir uns etwa die prachtvollen Paradiesvögel vorstellen; für unsere Betrachtungen aber steht es nicht im Vordergrund (Abb. 1.1).

Ein paar Antworten auf essenzielle Fragen bleibt uns Darwin freilich schuldig. Man darf sagen, dass sein Buch zwei große Lücken enthält, auf die schon sehr früh aufmerksam wurde. Wir vermissen das *Wie* der Vererbung und das *Woher* der Variation. Natürlich hatte sich Darwin zur Vererbung viele Gedanken gemacht. Seine Theorie dazu war allerdings widersprüchlich und stellte sich als falsch heraus. Die Mechanismen der Vererbung nahmen schließlich Gregor Mendel und die frühen Genetiker in Angriff. Darwin gibt allerdings keinen Grund dafür an, warum und wie Variationen überhaupt entstehen. Eine Lücke. Diese Fragen und die Antworten darauf werden sich wie ein roter Faden durch dieses Buch ziehen.

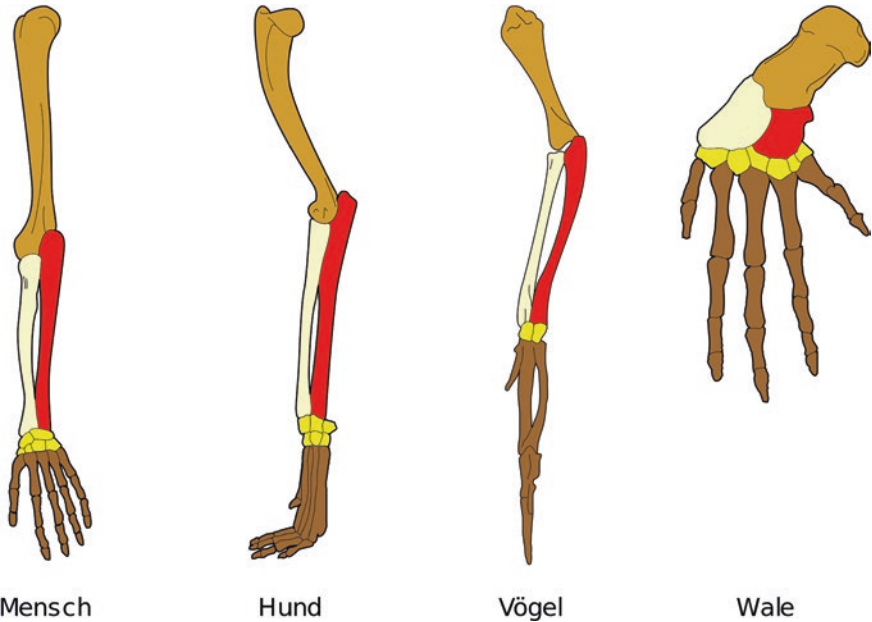
## Die Verwandtschaft allen Lebens

Aus Darwins epochaler neuer Sicht geht unmissverständlich hervor, dass die Arten aufgrund ihrer „Deszendenz mit Abänderung“ miteinander verwandt

sind. Alle Arten haben eine Abstammungsgeschichte. Diese Abstammungsgeschichten lassen eine zeitliche Abfolge der Aufspaltung der Ahnenreihen und der dabei aufgetretenen Modifikationen zu. Heute wissen wir: Der Mensch und alle Säugetiere stammen von mäuseähnlichen Arten ab, die vor mehr als 150 Mio. Jahren auf der Erde lebten und unauffällige Zeitgenossen der Dinosaurier waren. Säugetiere, Vögel, Reptilien, Amphibien, Fische, sie alle gehen auf kleine wurmähnliche Tiere zurück, die vor 600 Mio. Jahren im Meer lebten. Und alle Tiere und Pflanzen gehen zurück auf bakterienartige Einzeller, die vor drei Milliarden Jahren, das sind 3000 Mio. Jahre, lebten. Dass Darwin bereits eine gemeinsame Abstammung aller Lebensformen aus einfachen Organismen vermutete, war zur damaligen Zeit eine wirklich mutige These. Sie erwies sich erst viel später als richtig. Im Grunde erst, seit es mit Beginn dieses Jahrtausends möglich wurde, genetische Stammbäume zu erstellen, die zum Beispiel identische menschliche und Mausgene erkennen lassen und damit die Verwandtschaft dieser Organismen offenlegen. So sind sogar Genvergleiche zwischen dem Menschen und der in der evolutionsgeschichtlich viel älteren Fruchtfliege möglich. Und nicht zuletzt verweist die Tatsache, dass der genetische Code – das Bauprinzip für die Aminosäuren und Proteine – bei allen Lebewesen annähernd identisch ist, nachdrücklich auf eine gemeinsame Abstammung aller Lebensformen.

Die Evolutionstheorie lässt dieses spektakuläre Szenario vor uns entstehen. Die Theorie kann die ungeheure Anzahl verschiedener Arten, Gattungen und Familien auf unserer Erde wissenschaftlich begründen. Und sie kann erklären, wie alle miteinander verwandt sind. Sie kann erklären, warum Menschen, Katzen, Elefanten, Pferde, Fledermäuse und Wale, ja und alle Dinosaurier dieselbe Skelettgrundform, dieselbe Konstruktion der Extremitäten, aufweisen. Warum sie alle zwei Augen, eine Nase, ein Maul, eine Lunge, ein Herz haben. Der Fachmann spricht von homologen Strukturen. Dasselbe Konstruktionsprinzip unserer Hand gilt für gänzlich unterschiedliche Größen und Funktionen wie Laufen, Schwimmen, Fliegen oder Schreiben. Es muss zwangsläufig für alle diese homologen Hände einen gemeinsamen Vorfahren gegeben haben (Abb. 1.2).

Das alles ist in der Tat eine grandiose Schau des Lebens auf der Erde, gebaut auf den Säulen von Darwins Theorie. Ob diese Säulen noch ganz so dastehen, wie Darwin sie aufstellte, insbesondere mit der Selektion als dem alleinigen Motor der Evolution, das werden wir uns in diesem Buch Schritt für Schritt kritisch erschließen.



**Abb. 1.2 Homologe Wirbeltierextremitäten.** Die Extremitäten der Wirbeltiere sind mit allen Knochen homolog, das heißt, sie haben einen gemeinsamen Vorfahren mit denselben Knochenelementen. Sie können allerdings unterschiedliche Funktionen haben. Bemerkenswert ist die Variationsbreite in Größe und Form. Hingegen entstanden die Flügel von Vögeln und Insekten nicht homolog, sondern analog, also unabhängig voneinander

## Darwins Offenheit als Wissenschaftler

Was mich vor Darwin den Hut ziehen lässt, ist seine Offenheit im Umgang mit den eigenen Hypothesen. Verschiedenste mögliche Einwände, die gegen seine Theorie der natürlichen Selektion vorgebracht werden könnten, diskutiert er bereits selbst. Alternativen schließt er nicht kategorisch aus. Er betrachtet also manches aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Berühmt geworden und unzählige Male angeführt ist das Beispiel, dass Darwin Schwierigkeiten darin sah, die Evolution komplexer Strukturen wie etwa die des menschlichen Auges mit seiner Theorie zu erklären. Nein, noch deutlicher: Er gestand sogar, es erscheine ihm „im höchsten Grad absurd“, dass das Auge durch natürliche Selektion entstanden sein könne (Darwin 1859). Selbst Darwin kam das Auge wie ein System unabhängiger Einzelteile vor: die Netzhaut mit ihren Fotorezeptoren, um Bilder zu empfangen, Nerven, um Signale von der Netzhaut an bestimmte Hirnareale weiterzuleiten, die

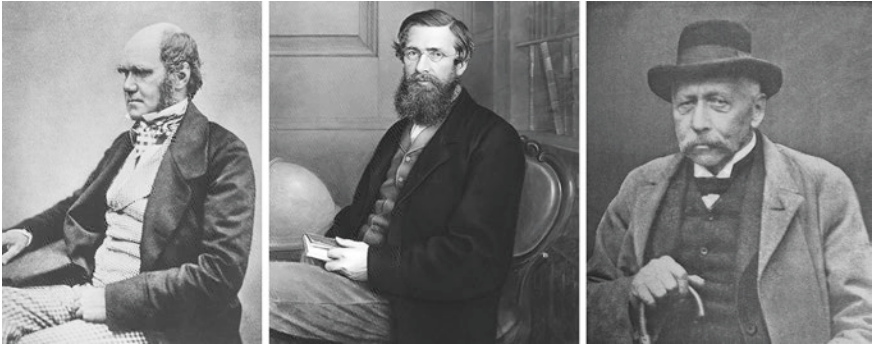
Linse, um zu fokussieren. Für sich allein hat offensichtlich nichts davon einen Nutzen. Wie kann die Linse „wissen“, dass sie eine Netzhaut zur Weiterverarbeitung der Lichtsignale benötigt? Darwin räumte ein, dass es vielleicht so aussähe, als könne das Auge nur in unserer perfekt erscheinenden Form funktionieren, wenn alle Teile ideal zusammenspielen. Welchen Entstehungsweg mochte es also genommen haben?

Aber Darwin wäre eben nicht Darwin, wenn er nicht im selben Atemzug die Überzeugung formuliert hätte, dass nachfolgende Generationen von Forschern gewiss aufdecken könnten, wie das Auge aus „einem unvollkommenen und einfachen“ Sehorgan evolviert ist und in der anfänglichen Form eben dennoch funktioniert hat, zwar weniger gut, aber durchaus nützlich für seinen Besitzer. Und dass es sich auf keinem anderen Weg als dem der natürlichen Selektion zu dem „vollkommenen und zusammengesetzten Auge“ entwickelt hat, wie wir es bei uns kennen. Für eine Schnecke ist es nun einmal ausreichend, wenn sie hell und dunkel unterscheiden kann. Mehr braucht sie bei ihrem Tempo für die Erkundung der Welt nicht.

Darwin macht auch schon mal eine Einschränkung, etwa wenn er – ebenfalls viel zitiert – schreibt: *Natura non facit saltum* (Darwin 1859), die Natur macht keinen Sprung. Dann aber heißt es sogleich dazu, dies sei eine „etwas übertriebene naturgeschichtliche Regel“ (Darwin 1872/2008). Bedenken wir: Das gesamte Theoriegebäude Darwins basiert auf kumulierten, kleinen Variationen. Sie werden in der Reihenfolge ihres Auftretens allesamt in der Population selektiert. Sprünge passen da nicht hinein; Darwin kann diese mit seiner Theorie gar nicht erklären. Wie sollen Sprünge entstehen? (Dazu später mehr.) Heutzutage schränkt kein Wissenschaftler mehr die eigenen Hypothesen in dieser Weise ein – das wäre viel zu gefährlich. Wer will schon andeuten, er habe auch nur ein Jota Zweifel an der eigenen Arbeit? Zweifel und Kritik sollen höchstens die Leser haben, am besten aber niemand.

## Alfred Russel Wallace der Mitentdecker

Am Ende dieses Abschnitts sei erwähnt, dass sich auch Darwin auf das Wissen anderer Wissenschaftler bezog. Der wichtigste, der erwähnt werden muss, ist Robert Malthus. Malthus (1766–1834) war Nationalökonom, ein Begründer dieser Disziplin. Von ihm stammt die Theorie, dass sich die Nahrungsressourcen bzw. die Bodenerträge auf der Erde linear vermehren lassen, während sich Lebewesen, auch der Mensch, stärker, nämlich progressiv vermehren. Eine Überbevölkerung würde zum Beispiel unweigerlich nach vielen Generationen auftreten, wenn jede Familie vier Kinder hat,



**Abb. 1.3** Charles Darwin, Alfred Russel Wallace und William Bateson. Drei große britische Evolutionstheoretiker und -biologen des 19. Jahrhunderts

die wiederum vier Kinder haben und so weiter, wenn nicht die Begrenzung durch die Nahrungsmittel gegenüberstände. Darwin sah diese Lehre als grundlegend dafür an, dass es zu Auseinandersetzungen um die begrenzten Ressourcen kommen muss. Die für diesen Kampf vorteilhafter ausgestatteten Individuen innerhalb einer Art haben selektive Vorteile.

Ich möchte aber noch mehr einen Zeitgenosse Darwins würdigen, das ist Alfred Russel Wallace (1823–1913; Abb. 1.3), wie Darwin Engländer und etwas später als dieser auf einer Reise auf die andere Seite der Erde. Wallace entwarf ebenfalls die Idee der natürlichen Selektion. Er geriet jedoch ziemlich in Vergessenheit. In einem Brief an Darwin stellte Wallace Darwin seine Theorie dar. Sie glich der Darwins, als wäre sie dessen eigene Handschrift. Darwin geriet in nicht geringe Aufregung deswegen. In einem Gentlemen's Agreement konnten schließlich die Ideen beider Forscher 1858 der Linnean Society in London vorgestellt werden, bevor Darwin 1859 sein lange vorbereitetes Hauptwerk veröffentlichte. Wallace ließ – großzügig wie er war – Darwin den Vortritt. Die Weitsicht Darwins hatte er vielleicht nicht, ein großartiger Naturforscher war er aber allemal. Wenn über den Mechanismus der natürlichen Selektion gesprochen wird, sollte dieser korrekterweise als Darwin-Wallace-Mechanismus bezeichnet werden (Kutschera 2004).

## Evolution ist eine Tatsache

Evolution ist eine Tatsache. Wenn wir einmal von komplizierten, wenig gebräuchlichen, philosophischen Verrenkungen absehen, ist Evolution eine Theorie im Sinne eines Systems wissenschaftlich begründeter Aussagen, die durch Beobachtung bestätigt werden. Diese Theorie kann Ausschnitte der

Realität mit zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten erklären und daraus Vorhersagen ableiten. Eine solche Vorhersage der Evolutionstheorie ist zum Beispiel, dass die Artenvielfalt auf der Erde in den nächsten Jahrzehnten weiter abnehmen wird, wenn die globale Temperaturerhöhung anhält. Wir werden zahlreiche andere Vorhersagen kennen lernen (Kap. 4–6). Gleichzeitig ist Evolution aber auch eine Tatsache im Sinne eines wirklichen, nachweisbaren, bestehenden und anerkannten Sachverhalts. Sie ist, so der berühmte Paläoanthropologe Donald Johanson, ein Fakt, genau wie die Gravitation (Leakey und Johanson 2011, YouTube). Beweise bedarf sie schon lange keiner mehr. Heute, 160 Jahre nach Darwin, sind viele Lücken in der Abfolge der Arten und zwischen den Arten und Familien geklärt. Missing Links sind kein wirkliches Thema mehr, seit die Molekularbiologie ins Detail gehen kann. Wir wissen heute, warum der menschliche Embryo im Mutterleib einen Schwanz entwickelt und ihn dann wieder zurückbildet, lange bevor das Baby auf die Welt kommt. (Manchmal geht das jedoch schief, und das Neugeborene hat einen knöchernen Schwanz als Verlängerung der Wirbelsäule.) Und wir wissen molekulargenetisch ziemlich exakt, wie nah wir mit dem Schimpansen oder dem Bonobo verwandt sind (Abb. 1.4) und wie entfernt mit Mäusen, Tauflieden oder Ringelwürmern.

Manches wissen wir gewiss heute noch nicht. So geht es uns wie Darwin mit dem Auge, und es ist uns wirklich nur schwer vorstellbar, wie der genetische Code evolutionär entstehen konnte. Er ist das für alle Lebewesen fast



**Abb. 1.4 Verwandter.** Ein junger Bonobo. Die genetische Verwandtschaft von Schimpansen, Bonobos und Gorillas mit dem Menschen ist sehr hoch. Aber bei rund 2 % Abweichung gibt es immerhin ca. 60 Mio. genetische Unterschiede. Dazu kommen noch mehr Unterschiede in der Genregulierung und Entwicklung

identische Schema, nach dem die kleinsten Bausteine hergestellt werden, die sich zu den Proteinen zusammensetzen, jenen komplizierten Stoffen des Lebens in allen Zellen. Noch vor wenigen Jahren konnte ich mir eine gute Antwort auf die Frage, wie die Säugetiere entstanden, nur schwerlich vorstellen. Die entwicklungsgeschichtlich älteren Amphibien und Echsen legen Eier, die ein ausreichendes Depot an Nährstoffen enthalten. Der Übergang zu einer embryonalen Entwicklung im Mutterleib sieht da schon nach einem gewaltigen evolutionären Sprung aus, musste doch dafür zuerst die Plazenta, also die Schnittstelle, die die Mutter mit dem Embryo verbindet, entstehen. Sie versorgt das junge Leben mit Nährstoffen und Sauerstoff aus dem mütterlichen Blutkreislauf. Eine solche Plazenta kann – sollte man denken – entweder vorhanden sein oder nicht. Wie aber soll ein schrittweiser, kumulativer Prozess für ihre Evolution aussehen? Hundert oder mehr Einzelschritte, bevor sie funktionsfähig ist? Tatsächlich existieren heute mehrere Theorien, wie die Plazenta bei den Säugetieren entstanden sein könnte, etwa durch eine virale Invasion (Retroviren) der Keimzellen (Ono et al. 2001). Allzu kompliziert kann es wiederum nicht gewesen sein, gibt es doch zahlreiche Fische, unter ihnen Haie, die lebend, und andere, die nicht lebend gebären. Mussten aber bei den Säugetieren nicht gleichzeitig mit der Plazenta auch die mütterlichen Milchdrüsen entstehen? Diese können wir uns doch ebenso nur als vorhanden oder nicht vorhanden vorstellen. Die Milch fließt oder sie fließt nicht. In der Tat eine ziemlich verzwickte Koordinationsaufgabe für eine Evolution, die kein Ziel kennt und in kleinen Schritten voranschreitet. Über den Sprung von einem Herz mit drei getrennten Kammern (Amphibien und Reptilien) zu einem Herz mit vier Kammern (Vögel und Säugetiere) will ich mich gar nicht erst auslassen: drei oder vier? Dreieinhalb oder gar 3,6 Kammern mit den passenden Zu- und Ableitungen des Bluts? Das kann es doch nicht geben, oder etwa doch? Das erinnert sehr an „ein bisschen schwanger“.

Wie auch immer: Niemand zweifelt mehr ernsthaft daran, dass der „geniale“ genetische Code ebenso wie das Fürsorgeverhalten der Säugetiermutter und andere knifflige genannte und nicht genannte Merkmale hundertprozentige Produkte der Evolution sind. Antworten, die noch fehlen, wird es irgendwann geben. Das Fazit ist: Die Evolution ist zu einem großartigen Wissensgebäude geworden. Zweifel an ihr haben nur noch die Ewiggestrigen.

## 1.2 William Batesons Gegenmodell

William Bateson (1861–1926) war Brite wie Darwin und 42 Jahre jünger als dieser. In Fachkreisen war er zu Lebzeiten berühmt, in Europa ebenso wie in den USA. Er wurde mit höchsten Ehrungen ausgezeichnet. Bateson



(Abb. 1.3) schuf den Begriff der Genetik und führte diesen Term auf einer Tagung in London 1906 offiziell in den Wissenschaftszirkel ein. Er war einer der Wiederentdecker der Schrift Gregor Mendels und trug maßgeblich zur Verbreitung der neuen Vererbungslehre bei. Neben alledem aber war Bateson das, was man einen Saltationisten (lat. *saltare*, springen) nannte. Weiter oben habe ich ja bereits zitiert, dass die Natur angeblich keine Sprünge macht, die Evolution laut Darwin folglich gradualistisch verläuft. Darwin äußerte sogar, seine Theorie würde vollständig zusammenbrechen, wenn auch nur an einem einzigen komplexen Organ gezeigt würde, das es nicht durch zahlreiche aufeinanderfolgende, kleine Modifizierungen zustande gekommen sein kann (Darwin 1872/2008). Genau hier setzte Bateson kritisch an, und genau das interessiert uns hier.

## Diskontinuierliche Variation

Besser lässt sich mit dem Begriffspaar kontinuierliche und diskontinuierliche Variation arbeiten. Kontinuierliche Merkmale sind etwa die Körpergröße oder das Gewicht. Sie nehmen verschiedene Werte in einem Kontinuum an. Bateson hingegen war ein vehementer Vertreter diskontinuierlicher Variation. Bei diesem Variationstyp treten zwei oder mehrere deutlich unterscheidbare diskrete Merkmale auf, zum Beispiel vier oder fünf Zehen. Bateson leugnete keineswegs rundweg Darwins Lehre, der zufolge Variationen kontinuierlich sind und sich in wiederholten Selektionsprozessen im Organismus anhäufen können. Doch er lehnte es rundweg ab, die natürliche Selektion zu einer Doktrin für die Evolution zu erheben und ihr einen Alleinanspruch zuzusprechen. Bateson sah in Abstammungslinien sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Veränderungen. Er stellte jedoch eine fundamentale Schwierigkeit fest, die aus Darwins Sicht hervorgeht: Wie kann es zu den klar abgegrenzten, also diskontinuierlichen Arten kommen, wenn die Unterschiede in den Umweltbedingungen, die die darwinschen Selektionsbedingungen darstellen, im Zeitverlauf fließend sind? Bateson spricht von einer spezifischen Diversität der Form der Lebewesen auf der einen Seite und einer Diversität der Umgebungen auf der anderen Seite. Die Veränderungen der letzteren gehen jedoch unmerklich in eine kontinuierliche Serie über (Bateson 1894). So steigen oder fallen etwa die Temperatur oder der Salzgehalt des Meerwassers nicht sprunghaft. Vulkanausbrüche, die eine abrupte Umweltänderung darstellen würden, sind selten und betreffen meist nicht eine ganze Population. Es besteht also überall Kontinuität, und dennoch haben wir klar unterschiedene Arten. Wie kann das möglich sein?

Für Bateson war das ein Kardinalproblem, auf das die Evolutionstheorie eine Antwort liefern musste. Wenn demnach – so seine Logik – die Diversität der Umwelt der ultimate Bestimmungsgrund für die Diversität der spezifischen Form der Arten ist, dann gibt es einen großen Bereich von Umwelt- und Strukturunterschieden, innerhalb dessen kein erkennbares Resultat entsteht. Alles bleibt, wie es ist, mit anderen Worten: „Die Beziehung zwischen Umwelt und Struktur ist nicht fein justiert“. In diesem Fall könne, so Bateson, die Selektion nicht die lenkende oder begrenzende Alleinursache spezifischer Unterschiede bei den Arten sein. Dann aber wäre es problematisch, die natürliche Selektion als Doktrin anzuerkennen (Bateson 1894). Um diese Ungereimtheit besser zu verstehen, plädierte er dafür, die Variation genauer unter die Lupe zu nehmen. „Variation ist das essenzielle Phänomen der Evolution. Variation ist in der Tat Evolution“ (Bateson 1894).

Um seiner Idee der Diskontinuität auf den Grund zu gehen, scheute Bateson keine Mühen. Sein 1894 erschienenes Hauptwerk *Materials For the Study Of Variation: Treated With Especial Regard To Discontinuity In The Origin Of Species* ist 600 Seiten dick. Die Kernaussage darin ist unmissverständlich: „Die Diskontinuität der Arten hängt von der Diskontinuität der Variation ab“. Bateson liefert unzählige Beispiele für diskontinuierliche Variationen in der Tierwelt, etwa Bienen mit Beinen anstelle von Antennen oder Krebse mit zusätzlichen Eileitern. Beim Menschen widmete er sich überzähligen Fingern (Polydaktylie), Extrarippen und Männern mit zusätzlichen Brustwarzen. Überall stellte er Diskontinuitäten fest (natürlich auch bei Farben), denen er eine Rolle bei der Entstehung von Arten zuschrieb. Bestärkt wurde er in dieser Ansicht dadurch, dass die Merkmale bei Kreuzungsversuchen nicht verschwinden, indem sie etwa in kontinuierlichen Mischformen aufgehen. Das war in Experimenten definitiv nicht der Fall. Die Varietät blieb stets bestehen.

Bateson berichtete 1897 über eine Reihe von Zuchtversuchen, die mit einem zierlichen Blütenpflänzchen, dem Glatten Brillenschötchen (*Biscutella laevigata*), in den botanischen Gärten von Cambridge durchgeführt wurden (Bateson 1897). In der Wildnis sind behaarte und glatte Formen von ansonsten identischen Pflanzen bekannt. Man kreuzte nun die Formen experimentell. Wie nicht anders erwartet, zeigten die gut gezüchteten Mischlingspflanzen im Aussehen noch immer entweder die eine oder die andere Ausprägung der Wildpflanze, keine Verschmelzung oder Regression des Merkmals auf eine mittlere Form. Es blieb bei einem Dimorphismus, also bei zwei klar unterscheidbaren Formen.

## Hundert Jahre Streit

Die Zündschnur für einen Streit darüber, wie relevant diskontinuierliche Merkmale in der Evolution sind, war gelegt. Dieser Streit hielt im 20. Jahrhundert lange an und wurde zeitweise sehr kompromisslos und bissig geführt. Bateson selbst stellte 1894 klar, dass seine Überlegungen zu diskontinuierlicher Variation nicht prinzipiell unverträglich mit dem Selektionsmechanismus seien. Allerdings verwahrte er sich, wie gesagt, entschieden gegen doktrinaire Lehren mit Alleingeltungsanspruch für die natürliche Selektion. Klar ist aber: Wenn Selektion in feinem Maßstab wirkt, hat sie einen anderen theoretischen Stellenwert als in einer Umgebung mit diskontinuierlicher Variation. Und intuitiv werden Sie als aufmerksamer Leser richtig vermuten, dass Umfang und Komplexität einer Diskontinuität darüber mitbestimmen, wie leicht oder schwierig sie in der gesamten Population durchsetzbar ist. *Hopeful monsters*, das sind plötzlich auftretende Mutanten, wie sie der deutsche Genetiker Richard Goldschmidt (1878–1958) später ins Spiel brachte, haben es da sicher nicht leicht. Darwins Perspektive scheint unvereinbar mit solchen, für die Evolution relevanten *Hopeful monsters* zu sein, während sie nach Batesons Ansicht der Schlüssel zu schnellen Übergängen, etwa von einem Drei- zu einem Vierkammerherz, sein könnten.

Um den negativen Ruf, den Richard Goldschmidt zu Lebzeiten genoss und der ihm nach seinem Tod nachhallte, muss man ihn nicht beneiden. Goldschmidt ist so etwas wie ein Vorzeige-Bösewicht in der Evolutionsbiologie und muss für die harten Vertreter der Synthetischen Evolutionstheorie dafür herhalten, wie die Sache *nicht* funktioniert. Allenfalls ließ man ihm durchgehen, dass artübergreifender Saltationismus sehr unwahrscheinlich ist; es lohne daher nicht, sich damit zu beschäftigen. Erst viel später, nach der Jahrtausendwende, konnte ein deutscher Genetiker, Günter Theißen von der Universität Jena, das falsche Bild über Goldschmidt korrigieren und ein neues Bild von Saltation mit zahlreichen Beispielen zeichnen konnte. Die Evolution der Blütenpflanzen (Angiospermen) ist dabei einer der bemerkenswertesten Fälle, für die keine graduelle Evolutionslinie erkennbar ist. Daneben gibt es zahlreiche andere Szenarien, für die gradualistische Pfade mit kontinuierlichen Veränderungen nicht plausibel erscheinen.

Wie Theißen deutlich macht, war sich Goldschmidt sehr wohl bewusst, dass Makromutationen in den allermeisten Fällen für einen Organismus nicht gut ausgehen, mit anderen Worten: letal sind. Die Ablehnung der Theorie Goldschmidts machte sich genau an diesem Punkt fest: Es sei unwahrscheinlich, dass springende Phänotypvariationen einen positiven Effekt

auf die Fitness haben, weil die Betroffenen keine guten Überlebenschancen hätten. Also spielte man sie immer wieder herunter. Ihre Unwahrscheinlichkeit oder vermutete Seltenheit sagt jedoch logisch nichts darüber aus, ob sie möglich sind und tatsächlich vorkommen. Genau hierauf richtet Theißen seine Aufmerksamkeit (Theißen 2009). Er macht in seinem Artikel (wie schon andere vor ihm) klar, dass viele paläobiologische Befunde keine gradualistischen Übergänge zwischen Arten, sondern vielmehr abrupte Wechsel aufzeigen. Auch wenn sie selten sind, könnten sogenannte makroevolutionäre Änderungen, eben auch durch Innovationen entstehen. Vielleicht geschieht so etwas mit der Veränderung eines Bauplans nur einmal in einer Million Jahren. Also genau an den Stellen, an denen wir aus dem Fossilbild keine Hinweise auf gradualistische, fließende Evolutionsverläufe haben, würden solche Ereignisse plausibel erscheinen – vorausgesetzt, man kann erklären, *wie* sie zustande kommen können.

Von Interesse ist an dieser Stelle somit der Hinweis auf die Mechanismen, die Goldschmidt für größere phänotypische Variation anführt. Schon vor ihm haben neben Bateson immer wieder auch andere, teils berühmte Biologen auf die Möglichkeit von Evolutionssprüngen hingewiesen, unter ihnen etwa der Botaniker Hugo de Vries (1884–1935), einer der Wiederentdecker der Schrift Mendels. Aber etwas zu behaupten und etwas zu erklären, sind zwei unterschiedliche Dinge. Tatsächlich nannte Goldschmidt zwei mögliche Mechanismen für Makromutation. Den ersten darf man gleich wieder vergessen; er bezieht sich auf systematische Neuordnungen von Chromosomen. Der zweite Mechanismus jedoch deutet laut Theißen in eine moderne Richtung, nämlich die der embryonalen Entwicklung. Goldschmidt glaubte, dass wichtige Gene (Kontrollgene) den frühen Entwicklungsverlauf ändern und auf diese Weise große Effekte im erwachsenen Phänotyp nach sich ziehen können (Theißen 2009). Im Licht dessen, was wir heute über evolutionäre Entwicklungsprozesse wissen und hier noch ausführlich kennen lernen, waren das weitsichtige Gedanken. Goldschmidt hat es verdient, erst genommen zu werden. Wenn Sie, lieber Leser, die Kap. 3 und 4 in diesem Buch gelesen haben, werden Sie wahrscheinlich ähnlich urteilen.

Heute erscheinen Diskontinuitäten in der Evolutionstheorie in einem völlig neuen Licht. Vor diesem Hintergrund werde ich darauf eingehen, was im Embryo geschieht, und wie die embryonale Entwicklung Diskontinuität zustande bringt. William Bateson waren tiefere Einblicke in das faszinierende Geschehen im Embryo noch versagt. Wohl deswegen schätzte er die Möglichkeiten der Embryologie für neue Erkenntnisse zur Evolution nicht hoch ein. Dennoch legte dieser unermüdliche Forscher mit seinem Fokus auf diskontinuierliche Variation einen markanten Grundstein für die heutige

Forschungsdisziplin Evo-Devo, die evolutionäre Entwicklungsbiologie oder kurz Evo-Devo (evolutionary developmental biology).

### 1.3 Die Zeit nach Darwin

Um 1900 war es ruhiger geworden um Darwin; man könnte auch sagen, seine Theorie war so gut wie tot. Alternative Sichtweisen auf die Evolution waren verstärkt im Umlauf. Auch die These des Franzosen Jean-Baptiste Lamarck (1744–1829), wonach Eigenschaften, die einmal im Verlauf des Lebens erworben werden, vererbbar sind – schon von Darwin nicht gänzlich abgelehnt – erhob sich damals wie ein Phönix aus der Asche. Erst die Entdeckung, dass die Vererbungslehre Gregor Mendels mit Darwin zusammengeführt, dass daraus also eine Synthese gebildet werden kann, brachte frischen Wind in die erlahmte Diskussion. Dazu musste aber die Schrift von Mendel wie erwähnt 1900 zunächst wiederentdeckt werden.

#### August Weismann – eine hartnäckige Doktrin

Die steile Hypothese des Freiburger Zoologen August Weismann aus dem Jahr 1883 erwies sich als ein Fels in der Brandung. Weismann (1834–1914) argumentierte, die Übernahme von Informationen erworbener Eigenschaften in die Keimzellen (also Samen- und Eizellen) sei unmöglich. Mit anderen Worten sagt Weismann: Veränderungen durch Umwelteinflüsse auf den Körper eines Individuums können keinerlei Auswirkungen auf den Phänotyp, also die Gesamtheit der erkennbaren Merkmale, der nachfolgenden Generation haben. Die Umwelteinflüsse müssten dafür irgendwie auf die Keimzellen einwirken können. Genau das aber schloss er aus. Körper- und Keimzellen entwickeln sich getrennt. Von einer einmal ausdifferenzierten Körperzelle gibt es keinen Weg zurück in die Keimbahn. Dieses Sicht setzte für hundert Jahre das Denken über Evolution auf ein festes Gleis, und es sollte eine große Schwierigkeit darstellen, die sogenannte Weismann-Barriere zu überwinden. Mit Weismanns Keimbahntheorie war das Ende des Lamarckismus eigentlich eingeläutet. Aber die Idee Lamarcks blieb hartnäckig und wird uns wieder beschäftigen, wenn ich die epigenetische und kulturelle Vererbung vorstelle (Abschn. 3.6).

Nicht übersehen werden darf ein anderer Beitrag Weismanns, der bis heute uneingeschränkt Gültigkeit hat. Er entdeckte die Bedeutung der Sexualität für die Evolution. Sexualität schafft eine signifikante

Variationsverbreiterung bei der Vererbung. Das geschieht mit heutigen Worten dadurch, dass das Kind von jedem Elternteil nur einen haploiden, also nur einen von ursprünglich zwei DNA-Strängen erbt. Erst auf dem vom Kind neu erstellten diploiden (kompletten) DNA-Strang wird dann für jedes Gen festgelegt, welches aktiv ist, das vom Vater oder das von der Mutter. Durch diesen Mechanismus entsteht „eine unerschöpfliche Fülle immer neuer Combinationen individueller Variationen, wie sie für die Selections-processe unerlässlich ist“ (Weismann 1892). Eine irreversible Vermischung der väterlichen und mütterlichen Anteile findet nicht statt. Sie bleiben als Einheiten bestehen, werden aber neu kombiniert. Mit diesen Einsichten in das Wirken der sexuellen Fortpflanzung eröffnete Weismann fundamentalen Einblick in die Antriebskräfte des Artenwandels.

### Wie sind die Gene definiert? – Wo sind sie zu finden?

Die klassische Genetik nahm derweil Fahrt auf. Sie erklärte, wie Mutationen vererbt und unter dem Einfluss der Selektion oder anderer evolutionärer Prozesse in bestimmte Richtungen gebracht oder in einem Gleichgewicht gehalten werden. Die klassische Genetik lieferte zahlreiche grundlegende, neue Erkenntnisse zur Vererbung. Lange war überhaupt nicht klar, welches die Erbsubstanz genau ist und wo man sie suchen müsse. Wer waren die „Täter“? Proteine, Aminosäuren, Nukleinsäuren oder deren Komponenten, die Nukleotide? Ein mühsamer Prozess. Der Streit darüber zog sich über die gesamte erste Hälfte des 20. Jahrhunderts hin. Erst Watson und Crick stellten schließlich die DNA ins Zentrum und läuteten damit ein neues Zeitalter ein, die Ära der Molekulargenetik. Die beiden Forscher entdeckten 1953 nicht ohne wesentliche Vorarbeit anderer, von denen kaum mehr jemand spricht, die herrliche Struktur der Doppelhelix der DNA mit ihren nur vier Bausteinen, den Nukleotiden. Ganz beiläufig machten Watson und Crick am Ende ihres kurzen Artikels in der Zeitschrift *Nature* die knappe, berühmt gewordene Anmerkung: „Es ist unserer Aufmerksamkeit nicht entgangen, dass die spezifische Paarbildung die wir hier voraussetzen, sogleich an einen möglichen Kopiermechanismus für das genetische Material denken lässt“ (Watson 2005/1968). Mehr britisches Understatement für eine solche Entdeckung geht nicht.

Schon zeitlich vor der Genetik und der hitzigen Suche nach der Vererbungssubstanz entwickelte sich eine neue Forschungsdisziplin, die Populationsgenetik, ohne die man Darwin und Evolution nicht verstehen kann. Tatsächlich wird Darwins Theorie am Beispiel von Individuen und ihren