

Erklären und Verstehen

Fragen und Antworten in den Wissenschaften

Herausgegeben von

Verena Klappstein und Thomas A. Heiß

Grundlagen der Rechtsphilosophie | 5

Franz Steiner Verlag

**Sonder-
druck**

Inhaltsverzeichnis

VERENA KLAPPSTEIN / THOMAS A. HEISS Fragen und Antworten <i>Eine Einführung</i>	7
MARCUS ELSTNER / MATHIAS GUTMANN / JULIE SCHWEER „Für sich bestehende Undinge“? Zur Logik von Maßbegriffen	13
BENJAMIN RATHGEBER Funktionen des Verstehens <i>Zur Logik von Erklären und Verstehen in den Wissenschaften</i>	43
SEBASTIAN A. E. MARTENS Law french? Das kommt mir spanisch vor <i>Zum schwierigen Verhältnis zwischen dem allgemein-gesellschaftlichen und dem speziell-juristischen Diskurs</i>	51
OLAF MUTHORST Schichten und Felder <i>Wissen in der Rechtswissenschaft</i>	69
BURKHARD JOSEF BERKMANN Epistemologie des Kirchenrechts <i>Fragen und Antworten in der Kanonistik</i>	81
BRITTA MÜLLER-SCHAUENBURG CJ Von der Offenbarung zur Erklärung? <i>Jüdische und christlich-theologische Konzeptionen des Verstehens</i>	113

FARID SULEIMAN
,Fragen & Antworten‘ in der Islamischen Theologie
*Eine Untersuchung am Beispiel des Problems der Willensfreiheit
in der Koranexegese*..... 133

PETER NICK
Causa finalis
Sind biologische Erklärungen Teil der Naturwissenschaft?..... 157

JAN-HENDRYK DE BOER
Veränderung erklären
Überlegungen zu einer zentralen Herausforderung der Geschichtswissenschaft 171

KLAUS RUTHENBERG
Was ist Chemie?
Eine Skizze der Philosophie einer vermeintlich unphilosophischen Wissenschaft..... 199

Causa finalis

Sind biologische Erklärungen Teil der Naturwissenschaft?

PETER NICK

Abstract: Der Beitrag befasst sich mit der Frage, wie biologische Erklärungen strukturiert sind und inwiefern sich dies von anderen Naturwissenschaften unterscheidet. Dies wird am Beispiel der Entstehung von biologischen Innovationen (sogenannter Makroevolution) exemplarisch betrachtet.

1. **Worin Biologie anders ist**

Wenn wir beschreiben und erklären, setzen wir uns mit der Welt auf wissenschaftliche Weise auseinander. Wir stellen dann einen Bezug zwischen einem Phänomen der empirischen Welt (dem *Explanandum*) und einer nicht-empirischen Denkfigur (dem *Explanans*) her. Wir führen das Phänomen auf eine oder mehrere Ursachen zurück, begründen also, warum es uns in dieser Form entgegentritt. Aristoteles hat vier Formen solcher Erklärungen vorgeschlagen, die entweder den Stoff (*causa materialis*), die Gestalt (*causa formalis*), die Wirkung (*causa efficiens*) oder den Zweck (*causa finalis*) in den Mittelpunkt stellen. Während in den anderen Naturwissenschaften eigentlich nur noch die *causa materialis* und die *causa efficiens* herangezogen werden, um Erklärungen anzufertigen, sind in der Biologie die *causa formalis* (die hier nicht behandelt werden soll) und die *causa finalis* (worum es hier gehen soll) sehr gängige Formen der Erklärung. Dies geschieht bezeichnenderweise auf der Basis eines deterministischen und vor allem grundsätzlich materialistischen Weltbilds. Während die hier entstehende Diskrepanz im 19. Jahrhundert durchaus empfunden und auch kontrovers ausgetragen wurde (vor allem in der Entwicklungsbiologie an der Grenze zum 20. Jahrhundert), hat man sich in der Biologie inzwischen daran gewöhnt, die *causa finalis* zwar ständig im Munde zu führen, aber nur selten darüber nachzudenken, dass diese Begründung eigentlich aus dem üblichen naturwissenschaftlichen Erklärungsschema herausfällt.

Die moderne Biologie definiert sich gerne als eine erweiterte und komplexere Variante der Physikochemie, benutzt aber dennoch die *causa finalis* als zentrale Ursache, um lebende Organismen zu beschreiben und zu erklären. Eigentlich eine milde Form von Schizophrenie, die durchaus eine nähere Betrachtung wert ist.

Zunächst wird, stellvertretend für viele andere Fälle, an der Blüte eines Fingerhuts kurz erläutert, in welcher Form hier alle vier aristotelischen Ursachen zur Erklärung eingesetzt werden (Nick und Gutmann 2019): Auf der Unterlippe des Fingerhuts sind sogenannte Saftmale zu finden, pigmentierte Flecken, die ein Staubblatt vortäuschen und einem Bestäuber (in der Regel intelligente Hautflügler wie Bienen oder Hummeln) signalisieren, dass es hier Pollen (eine sehr attraktive Nahrungsquelle) zu holen gibt. Wenn der Bestäuber landet, wird er durch Duftsignale dann zu den Nektardrüsen gelotst und nimmt auf dem Weg den Pollen auf. Der Pollen wird von diesen intelligenten Bestäubern nicht gefressen, sondern „verschont“, weil der Nektar als Belohnung hinreichend ist (Nektar ist für eine Pflanze billiger, da sie aufgrund der Photosynthese in Zucker „schwimmt“, während Pollen als proteinreiches Produkt den für Pflanzen sehr begrenzt vorhandenen bioverfügbaren Stickstoff in Form von Aminogruppen bindet). An diesem Beispiel lassen sich alle vier Aristotelischen Ursachen aufzeigen: die *causa formalis*, da die Gestalt der Pigmentierung (einem Staubblatt ähnelnd) während der Entwicklung von der Pflanze gesteuert werden muss; die *causa materialis*, da das Pigment, Anthocyan, aufgrund seiner stofflichen Beschaffenheit grünes Licht absorbiert, rotes Licht jedoch reflektiert, so dass die Saftmale rot erscheinen; die *causa efficiens*, da Anthocyan über einen komplexen Stoffwechselweg aus der Aminosäure Phenylalanin synthetisiert wird, woran mehrere Enzyme beteiligt sind, die in koordinierter Weise von den entsprechenden Genen gebildet werden müssen; und die *causa finalis*, da dieses Phänomen den Zweck erfüllt, Bestäuber anzulocken und auf diese Weise den Pollen zur nächsten Blüte zu transportieren. Da Pflanzen selbst unbeweglich sind, nutzen sie – man beachte diese ebenfalls teleologische Redeweise – andere Organismen, um ihre Eigenzwecke (hier die Fortpflanzung) verfolgen zu können.

2. *Causa finalis* – Darwins Trick

Lebewesen erscheinen, zumindest auf den ersten Blick, offensichtlich zweckmäßig organisiert. Dies schlägt sich in der typisch biologischen Redeweise nieder, wobei häufig formuliert wird, dass eine bestimmte Struktur oder ein bestimmter Vorgang entstanden sei, „um“ irgendeine Funktion zu erfüllen. „Die Saftmale auf der Unterlippe des Fingerhuts ahmen Staubblätter nach, um so Bienen anzulocken, die dann den Pollen auf andere Individuen übertragen“, „Der Pilzkörper der Honigbiene ist entstanden, um eine Vielzahl von Farben, Mustern und Gerüchen verarbeiten und sich so sehr effizient Blütennektar als neue Nahrungsquelle erschließen zu können“. Solche Formulierungen sind in der Biologie üblich und legen nahe, dass hier eine *causa finalis* am Werke sei.

Wenn man einen Biologen auf diesen Punkt hinweist, würde er das übrigens vehement abstreiten – nur um im nächsten Satz in dieselbe Redeweise zurückzufallen. Charles Darwin, der, übrigens nicht als Erster, auf die Zweckmäßigkeit von Lebewesen aufmerksam geworden war, fand hier eine interessante Erklärungsstruktur, indem er die *causa finalis* gleichsam auf den Kopf stellte und so zu einer *causa efficiens* machte. Dieser Trick, den er an der Taubenzucht entwickelte (diese Tauben gibt es tatsächlich und lassen sich in London im *Museum of Natural History* besichtigen), geht so: alle Tauben sind leicht unterschiedlich – manche haben einen ausgeprägteren Kropf, andere einen leichten Schopf, die dritten einen größeren Schweif (Darwin 1859a, 1868). Wenn nun der Züchter zwei Tauben mit einem ausgeprägten Kropf verpaart, werden beide diese Eigenschaft an die nächste Generation weitergeben, so dass die Nachkommen, allesamt etwas ausgeprägtere Kröpfe entwickeln, auch wenn sie dieses Merkmal wieder in unterschiedlichem Grad aufweisen. Werden nun unter diesen Nachkommen wiederum die Individuen mit dem größten Kropf verpaart, wird dieses Merkmal über die Generationen hinweg immer stärker werden. In der Tat belegen Darwins ausgestopfte Tauben im *Museum of Natural History*, dass schon nach vier Generationen Tauben herauskamen, die von der Ursprungsform völlig verschieden waren. Darwin verallgemeinerte nun dieses Beispiel auf „die Natur“. Die „Zuchtwahl“ (*selection*) wurde nun eben nicht bewusst von einem Züchter vollzogen, sondern auf natürliche Weise durch die Umweltbedingungen. Diejenigen Individuen, die besser mit den jeweiligen Bedingungen zurechtkommen, sind gleichsam diejenigen, die von „der Natur zur Züchtung zugelassen“ werden und dann die Eigenschaft, die für dieses bessere Überleben relevant ist, weitergeben und über die Generationen hinweg verstärken.

Das Geniale an dieser Denkfigur war, dass man die *causa finalis* nun durch eine *causa efficiens* (die Umweltbedingungen bewirken, dass nur bestimmte Individuen zur Paarung kommen, weil sie die anderen, weniger gut angepassten, ausmerzen) ersetzt hatte. Darwin war ja durchaus nicht der Erste, der die Artkonstanz (Arten sind von Gott geschaffen und ändern sich nicht) in Frage gestellt hatte – das war schon 50 Jahre zuvor von Jean Baptiste Lamarck in seiner *Philosophie Zoologique* (1809) formuliert worden. Freilich musste Lamarck noch auf eine *causa finalis*, den Vervollkommnungstrieb zurückgreifen, um die Veränderung der Arten zu erklären.

Der Enthusiasmus, den Darwins Denkfigur auslöste, ist verständlich – damit war die Biologie in den Schoß der Naturwissenschaften zurückgeführt und die Zweckmäßigkeit ohne Zuhilfenahme metaphysischer Kräfte erklärbar und dies auf sehr elegante Weise auf der Grundlage von nur drei Annahmen: (1) Individuen sind nicht einheitlich, (2) Diese Verschiedenheit wird vererbt, (3) Abhängig davon, wie gut diese Verschiedenheit in die jeweilige Umwelt „hineinpasst“ (*fit in*) ist der Erfolg der Fortpflanzung und damit die Reproduktion der jeweiligen Verschiedenheit mehr oder weniger ausgeprägt. Diese Denkfigur funktioniert selbst dann sehr gut, wenn man keine Ahnung von den zugrundeliegenden Mechanismen hat. Weder wusste Darwin etwas von Mutationen und sexueller Rekombination, mit denen die Verschiedenheit inzwischen

erklärt wird, noch hatte er eine korrekte Vorstellung vom Vorgang der Vererbung (in der Tat folgte Darwin lamarckistischen Vorstellungen). Ebensovienig wusste er etwas von Genen oder gar von DNS. Interessanterweise wurde die Darwinsche Erklärung hundert Jahre lang erfolgreich eingesetzt, ohne dass diese Fragen auch nur ansatzweise geklärt waren. Daran kann man sehen, dass diese Art von Erklärung von den Details vollkommen abgekoppelt werden kann und dennoch sehr gut funktioniert.

3. Makroevolution – Darwins blinder Fleck

Darwins Erklärung ist stark von der Denkschule des Gradualismus geprägt, vermutlich durch den Einfluss seines Geologen-Freunds Charles Lyell, der betonte, dass die Natur keine Sprünge mache, und dass jede Veränderung darum in kleinen Schritten erfolge. Auch in der Biologie galt Linnaeums Satz „*natura non facit saltus*“ (1751) als unumstritten. Auch wenn dieser Satz sich auf die Unveränderbarkeit von Arten bezog, was ja von Darwin gerade in Frage gestellt wurde, verstand Darwin den Artwandel als kontinuierliche Veränderung, die sich in kleinen Schritten, also ohne Sprünge vollziehe: „I have called this principle, by which each slight variation, if useful, is preserved, by the term of Natural Selection, in order to mark its relation to man’s power of selection“ (Darwin 1859b). Genau hier liegt Darwins blinder Fleck: Zwar lässt sich über kleine Schritte durch Variation und Zuchtwahl ein hypertropher Taubenkropf aus einem solchen normaler Größe ableiten, wie aber ein Taubenkropf als neue Struktur entsteht, wird so nicht verständlich. Egal, ob es sich um ein neues Organ handelt, einen neuen Stoffwechselweg oder eine neue Art von Verhalten – es ist schwer zu verstehen, wie dies durch zufällige Variation quasi aus dem Nichts entstanden sein und von Anfang an einen selektiven Vorteil gebracht haben soll. Und ohne selektiven Vorteil wäre das Neue nicht beibehalten worden, sondern sogleich wieder verschwunden. Ebensovienig lässt sich verstehen, wie eine vorhandene Struktur sich in kleinen Schritten in eine neue Struktur mit völlig anderer Funktion umwandeln lassen sollte. Darwin fühlte dieses Manko durchaus und forderte daher die Existenz sogenannter *missing links*, die als Mosaik noch alte und schon neue Merkmale beinhalten sollten. Das Fossil des Urvogels *Archaeopteryx*, 1874 von dem Bauer Achim Niemeyer in Eichstätt entdeckt und für eine Kuh im Werte von 150 Goldmark eingetauscht, wurde aus eben diesem Grund zu einer Ikone der Evolutionsbiologie: Hier fanden sich neue Merkmale (Federn) gemeinsam mit alten (ein Maul mit Zähnen). Freilich wirft dieses *missing link* mehr Fragen auf als es beantwortet – eine Feder ist ja selbst schon eine außerordentlich komplexe Struktur, die erst entstanden sein muss, bevor ein Nutzen dieser Feder für die neue Bewegungsart des Fliegens überhaupt vorstellbar war. Welche Selektionsvorteile haben also diese Vorformen der Feder begünstigt und stabil gehalten? Für 150 Goldmark ist die Absolution von Darwins blindem Fleck also nicht zu bekommen.

Das Problem wird noch zugespitzt, wenn eine Struktur, die in sehr vollkommener Weise eine bestimmte Funktion erfüllt, sich so umwandelt, dass sie nun eine andere Funktion, auf ebenso vollkommene Weise, ausüben kann, wenn sich also die *causa finalis* verschiebt. Hier muss es Zwischenformen geben, die hinsichtlich der ursprünglichen Funktion nicht besser, sondern schlechter sind. Hat hier die Evolution dann „wegen Umbau geschlossen“? Natürlich nicht. Jeder einzelne Schritt des Übergangs muss nicht nur in sich selbst funktional bleiben, sondern seine Funktion auch noch so erfüllen, dass in der Summe ein Selektionsvorteil herauspringt.

Für diesen, vielleicht etwas abstrakt anmutenden, Fall gibt es zahlreiche Beispiele. Herausgegriffen sei eines, was den Autor während seiner Studienzeit sehr beschäftigte, weil er darauf von einer Koryphäe der Evolutionsbiologie, Prof. Osche in Freiburg, nur oberflächliche und ausweichende Antworten bekam: es geht um das Halteorgan des Schiffhalterfisches, ein sehr komplexes Gebilde mit vielen kleinen Knochenbälkchen und Hautlappen, die durch Kontraktion der Muskeln ein Vakuum erzeugen, so dass dieser Fisch sich an großen Vehikeln wie Haien, Walen oder später Schiffen, anheften und so über große Strecken wandern kann ohne dafür auch nur die geringste Energie aufwenden zu müssen. Der Selektionsvorteil liegt also auf der Hand. Weniger auf der Hand liegt der Weg, wie dieses komplexe Organ in kleinen Schritten entstanden sein soll; denn der Ausgangspunkt ist die Rückenfinne der Stammform des Schiffhalters, der Goldmakrele, die mit dieser Rückenfinne außerordentlich wendig und schnell den Attacken von Räufern ausweichen kann. Eine Goldmakrele, deren Rückenfinne verkürzt wäre, wäre daher sehr bald eine tote Goldmakrele, ihre Gene trügen also nicht zur Abstammungslinie des Schiffhalters bei. Wie haben es also diese Übergangsformen, die weder gut schwimmen, noch gut saugen konnten, durch dieses selektive Interregnum geschafft?

Es sind genau solche Fälle, wo eine Komplexität als „nicht reduzierbar“ erscheint, bei denen Darwins Erklärung nicht gut funktioniert. Genau in diese wunde Flanke der Darwinschen Theorie zielen die intellektuell daherkommenden Versionen des Kreationismus, die als sogenanntes *Intelligent Design* nicht nur in den USA immer mehr Anhänger finden. Solche Fälle „nicht reduzierbarer“ Komplexität werden in dieser Denkschule im Sinne von „nicht auf eine Erklärung reduzierbar“ dargestellt und als sogenannte *intelligence marks* eines absichtsvollen Schöpfungsaktes gedeutet. Die Auseinandersetzung mit Anhängern des *Intelligent Design* ist außerordentlich mühsam. Zum einen sind Halbwahrheiten deutlich schwerer zu widerlegen als blanke Lügen, zum andern treffen hier Sichtweisen aufeinander, die komplementär sind. Letztendlich ist es ein Setzungsakt, ob man versuchen will, das Problem der Makroevolution auf der Grundlage der Evolutionstheorie zu erklären, oder ob man dieses Problem als Beleg dafür heranzieht, dass die Evolutionstheorie hier nicht funktioniert. Wir bewegen uns hier also auf der dritten Ebene der Erklärung, wo man allenfalls versuchen kann, Inkonsistenzen in der Argumentationskette von *Intelligent Design* sichtbar zu machen (die gibt es durchaus, die gibt es leider aber auch auf der Seite der Darwinschen Theo-

rie). Überzeugen lässt sich ein eingefleischter Anhänger des *Intelligent Design* nicht, ebensowenig wie man Wunder wissenschaftlich beweisen oder widerlegen kann.

Es ist weit fruchtbarer, den Kernpunkt des *Intelligent Design*, die Makroevolution, nicht verschämt unter den Teppich zu kehren, wie es in der Evolutionsbiologie gerne geschieht, sondern *Intelligent Design* als Stachel im Fleische der Darwinschen Theorie zu begreifen und nach Wegen zu suchen, wie man „nicht reduzierbare Komplexität“ zwar nicht reduzieren, aber doch im Einklang mit der Darwinschen Erzählung erklären kann.

4. Die Rede von der Präadaptation

Was ist das eigentliche logische Problem der Makroevolution? Das Problem besteht darin, dass ein Merkmal entsteht und stabil bleibt, obwohl es (noch) gar keinen Selektionsvorteil bringt. Dieser entsteht erst Generationen später, wenn andere Strukturen oder Funktionen hinzutreten und so dem schon vorhandenen Merkmal „einen Sinn verleihen“. Für dieses Phänomen wurde von dem französischen Zoologen und Genetiker Lucien Cuénot (1901) der Begriff „préadaptation“ geprägt. Dieser Begriff trägt eine stark teleologische Färbung, weshalb Gould und Vrba (1982) hierfür den weniger belasteten Term Exaptation vorschlugen, der sich aber nicht wirklich durchgesetzt hat. Der Begriff Präadaptation legt nahe, dass ein Merkmal gewissermaßen eine „Vorangepassung“ an etwas ist, was erst in der Zukunft Wirklichkeit werden wird und impliziert daher, dass hier eine *causa finalis* am Werke sei. Freilich ist das nicht zwingend, wie schon Darwin selbst am Beispiel der Fissuren des Säugetierschädels diskutiert

The sutures in the skulls of young mammals have been advanced as a beautiful adaptation for aiding parturition, and no doubt they facilitate, or may be indispensable for this act; but as sutures occur in the skulls of young birds and reptiles, which have only to escape from a broken egg, we may infer that this structure has arisen from the laws of growth, and has been taken advantage of in the parturition of the higher animals (Darwin 1859c).

In diesem Beispiel ist die Struktur (*the sutures in the skulls*) zunächst einmal eine Konsequenz der „laws of growth“, womit gemeint ist, dass eine Schädelstruktur, die noch wachsen muss, nicht vollständig verknöchert sein kann. Die noch lange flexibel bleibenden Fissuren des Vertebratenschädels stehen hier also im funktionellen Kontext der von einem wachsenden Organ benötigten Flexibilität. Später, im funktionellen Kontext der Säugetier-Geburt bringt diese Flexibilität noch einen weiteren Vorteil, wenn der Schädel des Jungtiers sich leichter an den engen Geburtskanal anpassen kann. Diese „Präadaptation“ war natürlich bei Reptilien und Vögeln noch nicht „vorgehen“. Präadaptation hängt also mit einem Funktionswechsel zusammen und hat also mehr mit dem Kontext einer Lebensform zu tun als mit ihrer genetischen Konstitution. Ein- und dieselbe Struktur kann also unterschiedliche Zwecke erfüllen, je nach

dem, in welchen funktionellen Kontext diese Struktur gerückt wird. Dieser Punkt wird unten noch einmal thematisiert werden.

Um auf das anfängliche Beispiel des Fingerhuts zurückzukommen, erscheint hier die Synthese des anlockenden Farbstoffs Anthocyan als ein Fall von „nicht-reduzierbarer Komplexität“. Wie soll man sich erklären, dass ein solch komplexer Weg schrittweise entstanden sein sollte, wenn er ohne die Existenz einer Blüte (ebenfalls eine komplexe Struktur) den Zweck der Bestäubung gar nicht erfüllen kann? Die Denkfigur der Exaptation lässt sich jedoch auch auf dieses Beispiel sehr gut anwenden: die Anthocyane entstehen nämlich als Endprodukte des sogenannten Flavonoidwegs. Flavonoide sind Sekundärstoffe, die sehr gut UV-Licht absorbieren können, stellen also eine Art „Sonnenbrille der Pflanze“ dar. Als vor etwa 500 Millionen Jahren die ersten Pflanzen das feste Land eroberten (und damit übrigens auch für unsere Lebensform, die Tiere, zugänglich machten), war die UV-B Strahlung ein schwerwiegendes Problem, weil sie Zellschäden (unter anderem Veränderungen der DNS-Sequenz) auslöst. Die Bildung von UV-absorbierenden Substanzen stellte daher einen großen Selektionsvorteil dar. Wenn solche Flavonoide mit den durch UV-B entstandenen reaktiven Sauerstoffspezies interagieren, können sie zu größeren Ringmolekülen abreagieren, den Anthocyanen. Die Rotfärbung war also gleichsam ein „Abfallprodukt“, das beim Abfangen von UV-Licht entstand. Die Keimzellen wurden durch einen besonders hohen Gehalt an solchen Flavonoiden geschützt – der Selektionsvorteil liegt auf der Hand; ein solcher Schutz verbessert die Qualität des Vererbungsprozesses. Aus diesem Grund verfärbt sich vor allem auch das Gewebe in der Nähe der Keimzellen besonders schnell und stark rot. Nun kommt der Funktionswechsel: in dem Augenblick, da ein nahrungssuchendes, primitives Insekt (vermutlich ein Käfer) durch diese rote Färbung angelockt wurde und hier auf eine attraktive Nahrungsquelle (Pollen) traf, änderte sich der funktionelle Kontext des Anthocyan. Aus einem Abfallprodukt des UV-Schutzes verwandelte es sich zum entscheidenden Faktor für die Anlockung von Bestäuberinsekten. Genetisch ist hier nicht viel passiert – die Veränderung liegt eigentlich außerhalb der Pflanze selbst, nämlich in einer neuen Wechselwirkung mit ihrer Umwelt (dem bestäubenden Käfer). Da beide Seiten von dieser neuen Wechselwirkung profitieren (der Käfer hat eine neue Nahrungsquelle erschlossen, die seinen Mitkäfern nicht zur Verfügung steht), entsteht nun eine gemeinsame evolutionäre Geschichte, wobei auf der Seite der Pflanzen der „teure“ Pollen durch „billigen“ Nektar ersetzt wird, während auf der Seite der Insekten die „tumben“ Käfer durch „intelligente“ Hautflügler ersetzt werden, die eine Vielzahl von Formen und Farben unterscheiden und sich so exklusive Nahrungsquellen erschließen können (die Salbeiblüte ist so geformt, dass nur noch Hummeln und Bienen an den Nektar gelangen – die Fähigkeit, eine Salbeiblüte zu erkennen, bringt also einen handfesten Fortpflanzungsvorteil).

Für das oben genannte Beispiel des Schiffshalters ließ sich das Problem des Verfassers übrigens ebenfalls durch einen solchen Funktionswechsel erklären: In einem Schweizer Museum wurde 2008 ein Fossil des Fisches *Opisthomyzon* entdeckt, der

vor etwa 30 Millionen Jahren lebte und eine Übergangsform auf dem Weg von der Rückenflosse der Goldmakrele zum Halteorgan des Schiffshalters aufweist (Britz und Johnson 2012): Hier ist eine Strebe der Rückenfinne zu einem Dorn ausgebildet. Man vermutet, dass diese Zwischenform sich mit diesem Dorn an Trägerfischen festhaken und so „per Anhalter“ mitreisen konnte. Damit verschob sich der funktionelle Kontext der Rückenflosse, der ursprüngliche Selektionsdruck (optimale Steuerung des freien Schwimmens) wich einem neuen Selektionsdruck (festere und steuerbare Anheftung an einen Trägerfisch). Genetisch lässt sich eine solche hypertrophe Strebe leicht erklären – es genügt, dass durch eine Mutation in einer Steuersequenz (Promotor) eines am Knochenwachstum beteiligten Gens dieses Gen für negative Regulatoren (die das Längenwachstum begrenzen) weniger empfindlich wird, weil der entsprechende Regulator weniger gut binden kann. Das hätte zur Folge, dass diese Strebe ungebremst weiterwächst, wodurch ein Dorn entstünde.

Die Denkfigur der Exaptation rückt also die Makroevolution in die Sphäre des funktionellen Zusammenhangs einer Lebensform mit ihrer Umwelt. Wenn sich die Umwelt ändert, ändert sich dieser Zusammenhang, auch wenn sich die genetische Konstitution der Lebensform wenig oder gar nicht ändert. Damit entfällt auch die Forderung, dass Makroevolution mit umfangreichen genetischen Änderungen einhergehen müsse. Muss sie nämlich gar nicht und tut sie zumeist auch gar nicht. Das Problem der „nichtreduzierbaren Komplexität“ verwandelt sich dadurch in ein Problem der „flexiblen Änderung von Funktionen“ und dieses Problem ist durchaus mit dem Werkzeugkasten der Biologie zu bewältigen. Es würde den funktionellen Kontext dieser Tagung sprengen, dies im Einzelnen auszuführen. Daher seien beispielhaft zwei Elemente dieses Werkzeugkastens herausgegriffen: Modularität und Basteln als wichtige Elemente evolutionären Wandels.

5. **Ausweg 1: Natur spielt LEGO**

Makroevolution wird auch deshalb als schwer erklärbar gesehen, weil hier die implizite Annahme mitschwingt, dass große Veränderungen der Gestalt mit Änderungen in vielen Genen einhergehen müssten. Darwins Taubenzüchter müsste daher nicht nur die Variation ganzer Genkomplexe in die Zuchtwahl mit einbringen, sondern erst einmal auf solche günstigen Kombinationen zugreifen können. Da die Häufigkeit von bestimmten Kombinationen für mehrere Gene einer Binomialfunktion folgt und daher für zunehmende Genzahlen immer unwahrscheinlicher wird, gelangt man dann schnell zu dem Thomas Henry Huxley zugeschriebenen Bild des zufällig tippenden Affen (der Satz wurde so vermutlich nie gesagt):

Six eternal apes, randomly striking the keys of six eternal typewriters with unlimited amounts of paper and ink would be able to produce Shakespearean sonnets, complete

books, and the 23rd Psalm. In the same way, molecular movement, given enough time and matter, could produce Bishop Wilberforce himself, purely by chance and without the work of any Designer or Creator.

Diese implizite Annahme ist jedoch falsch und daher brauchen wir keinen „eternal ape“ – das Shakespearsche Sonnett besteht nämlich nicht aus zufällig zusammengestellten Einzelbuchstaben, sondern aus Worten, die als Ganzes reproduziert und dabei abgewandelt werden. Die Worte, um in der Metapher zu bleiben, sind Module, also in sich geschlossene und recht robuste Einheiten, die wiederholt und abgewandelt werden. Die Modularität alles Lebenden zeigt sich nicht nur auf struktureller Ebene, sondern auch auf der Ebene der Aktivität. Einige Beispiele:

- Die gesamte Vielfalt von Arthropoden-Bauplänen lässt sich durch rhythmische Wiederholung und Abwandlung von Segmenten beschreiben, wobei an jedem Segment andere Anhängsel (etwa Beine, Antennen oder Mundwerkzeuge) ausgeformt sind.
- Die gesamte Vielfalt von Wirbeltier-Gliedmaßen lässt sich durch rhythmische Wiederholung und Abwandlung von Fingergliedern beschreiben, die unterschiedlich stark ausgebildet werden – der Fledermausflügel entsteht so über eine Verlängerung der Finger, zwischen denen die Haut aufgespannt ist, der Flügel eines Flugsauriers gar nur über Verlängerung eines einzigen Fingers, der Pferdehuf über eine Verlängerung des Mittelfingers.
- Die gesamte Vielfalt von Landpflanzen lässt sich durch rhythmische Wiederholung und Abwandlung modularer Bausteine (Telome) beschreiben, die jeweils aus einer verholzten Gefäßröhre bestehen, die von Grundgewebe umgeben und durch eine wasserdichte Epidermis abgeschlossen wird.
- Die gesamte Vielfalt der Angiospermenblüten lässt sich durch rhythmische Wiederholung und Abwandlung von Blättern beschreiben, die in Wirteln angeordnet und unterschiedlich ausdifferenziert sind. Genetisch sind hier nur drei Genschalter, die sogenannten ABC-Gene, von Belang, die kombinatorisch festlegen, welches Blütenorgan sich aus einer auswachsenden Blattanlage entwickeln kann.
- Die Entstehung dieser modularen Bausteine ist wiederum die Manifestation rhythmischer Aktivität: die Insektensegmente entstehen durch Gradienten von Transkriptionsfaktoren (Proteinen, die Gene aktivieren können), wodurch wiederum die Entstehung neuer Gradienten bewirkt wird, ähnlich wird die unterschiedliche Ausprägung von Blättern zu Blütenorganen durch ein zeitliches Muster von ähnlichen Genschaltern geregelt (Gutmann und Nick, 2019).

Die Details tun in diesem Zusammenhang nichts zur Sache – viele sind auf molekularer Ebene schon recht gut verstanden, andere weniger. Wichtig ist dabei, dass mit

relativ geringen und „unspektakulären“ genetischen Veränderungen relativ große und „spektakuläre“ Veränderungen des Bauplans erzeugt werden können. Ob ein Insekt mit sechs oder ein Krebs mit zehn Beinen entsteht, hängt davon ab, wie oft eine solche modulare Aktivität wiederholt wird und dies hat häufig damit zu tun, wie schnell und wie stark das entsprechende Schalterprotein gebildet wird. Selbst einzelne Punktmutationen können hier relevant werden, weil dadurch die Bindung von steuernden Proteinen an die Steuerregion solcher Proteine verändert wird.

Durch die Modularität (die rhythmische Wiederholung von Aktivitäten) lässt sich also mit recht wenig Genetik sehr viel Morphologie erzeugen. Wenn nun die zeitliche Ordnung solcher Aktivitäten wiederum neue morphogenetische Aktivitäten bedingen, kann sogar eine leichte Verschiebung von zwei Entwicklungsvorgängen zu drastisch veränderten Phänotypen führen (sogenannte Heterochronie). Bekannte Beispiele sind der Axolotl (eigentlich ein vorzeitig geschlechtsreif gewordener Amphibienembryo), die Entstehung von Lilienblüten durch vorzeitige Aktivierung der B-Gene oder der als zunächst als neue Art beschriebene Skye-Ökotyp der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*, der später als heterochrone „Makromutante“ erkannt wurde. Hier führten zwei sehr unscheinbare Mutationen in zwei Genen, die den Blühzeitpunkt bestimmen, dazu, dass die Entwicklung von Blattrosetten (sonst bei der Induktion der Blüte inaktiviert) weiterläuft, so dass ein monströses Gebilde entsteht, bei dem kleine Tochterpflänzchen über sogenannte Viviparie in den Achseln der Blütenknospen auswachsen und später abfallen, was im kurzen Sommer der Äußeren Hebriden ein entscheidender Selektionsvorteil ist (Grbić and Bleecker, 1996).

Das grundlegendste biologische Modul ist die Zelle. Wie von dem Botaniker Matthias Schleiden (1838) gemeinsam mit seinem Freund, dem Zoologen Theodor Schwann (1839) erkannt und als sogenannte Zelltheorie formuliert, sind alle Lebensformen aus Zellen aufgebaut, die sich in vielen Eigenschaften ähneln. Die rhythmische Folge von Wachstum, Verdopplung der DNS und deren symmetrische Verteilung auf zwei sich trennende Tochterzellen wird so zur modularen Aktivität schlechthin, aus der alle Lebensformen hervorgehen.

Die Natur spielt also LEGO durch rhythmische Wiederholung robuster (und genetisch konservierter) Aktivitätsmuster, die zeitlich gegeneinander verschoben oder auch während ihrer Ausprägung abgewandelt werden können. Diese Verschiebungen oder Abwandlungen sind eigentlich das Gegenteil genetischer Kontrolle, vielmehr ist die genetische Kontrolle hier eher permissiv und greift lediglich in Form einer recht lockeren Kanalisierung in Selbstorganisationsprozesse ein. Damit wird die ganze Vorstellung einer sehr komplexen und sehr streng auszuführenden genetischen Kontrolle, die natürlich nur schwer in Darwinschen kleinen Schritten zu haben ist, auf den Kopf gestellt: Makroevolution entsteht also eher aus zu wenig, nicht aus zu viel Genetik.

6. *Ausweg 2: L'évolution – c'est bricolage*

Es ist also gerade das Nicht-Bestimmte, das „Wackelnde“ modularer Aktivität, was die Evolution neuer Baupläne durch veränderte zeitliche Muster erlaubt. Dieses „evolutionäre Wackeln“ zeigt sich auch auf der Ebene der Funktion. Biologische Strukturen sind nämlich nicht auf eine einzige Funktion hin entstanden, sondern können in der Regel unterschiedliche Funktionen ausüben. Die *causa finalis* muss also durch mehrere und teilweise recht diverse *causae* ersetzt werden. Biologische Strukturen sind also gewöhnlich eierlegende Wollmilchsäue und damit fast immer weiter entfernt von einer optimalen Beziehung zwischen Struktur und Funktion, was Jacob in seinem sehr lesenswerten und tiefgründigen Aufsatz „Nature as Tinkerer“ eindrücklich ausgeführt hat: „It is always a matter of using the same elements, of adjusting them, of altering here or there, of arranging various combinations to produce new objects of increasing complexity. It is always a matter of tinkering.“ (Jacob 1977). Das Geschick eines Bastlers wird durch zwei Fähigkeiten bestimmt: 1. Wie innovativ ist er dabei, Vorhandenes auf neue Weise zu verbinden? 2. Wie organisch und bündig kann er den Raum zwischen den kombinierten Elementen verfugen? Hier kommt nun die Multi-Funktionalität aller durch Evolution entstandenen Strukturen zum Tragen: da viele, teilweise sogar widersprüchliche Selektionsdrücke herrschen, ist eine biologische Struktur immer ein Kompromiss aus verschiedenen Anforderungen.

Es gibt zahlreiche, auch auf molekularer Ebene verstandene, Beispiele für „evolutionäres Gebastel“. So akzeptieren viele Enzyme neben ihrem „angestammten“ Substrat auch andere, ähnliche, Moleküle, freilich mit geringerer Effizienz. Unter Normalbedingungen wird also eine, die „angestammte“, Reaktion vorherrschen, wenn jedoch aufgrund veränderter Umstände, konkurrierende Substrate die Oberhand gewinnen, kann diese „Schattenfunktion“ des Enzyms plötzlich an die Stelle der „angestammten“ Reaktion treten. Das so erzeugte veränderte Produkt kann dann wiederum die stromab wirkenden Enzyme dazu führen, ebenfalls bislang nicht beobachtete „Schattenfunktionen“ zu entfalten. Vor allem beim pflanzlichen Sekundärstoffwechsel (der unter anderem für die eingangs erwähnte Fingerhutblüte relevant ist) ist es ein häufiges Phänomen, dass eine kleine genetische Veränderung in einem bestimmten Enzym ein ganzes Bouquet neuartiger, vorher in dieser Pflanze nicht gefundenen, Stoffe hervorbringt. Man spricht in solchen Fällen von „moonlighting“ (engl. für Schwarzarbeit). Inzwischen finden sich immer mehr Fälle, wo Proteine, denen man nie so richtig eine klare Funktion zuordnen konnte, die also notorische „Schwarzarbeiter“ sind, abhängig von ihren unterschiedlichen Bindepartnern völlig unterschiedliche Funktionen ausüben können. Hier hat man also das molekulare Korrelat der wandelbaren Fügemasse, die für erfolgreiches Basteln unverzichtbar ist.

Eine evolutiv entstandene Struktur ist also nie wirklich für eine einzige Funktion optimiert, sondern immer nur für eine Gemengelage mehrerer Funktionen. Sie oszilliert dabei immer um dieses Optimum, erreicht es aber nie vollständig – weil lebende

Organismen eben dynamische Systeme in einer dynamischen Umwelt sind. Genau diese Oszillation schafft das „Spiel“ (im Sinne des mechanischen Spiels einer schlecht sitzenden Schraube), welches das Basteln erleichtert. Es ist gerade das Unvollkommene lebender Systeme, was sie zum erfolgreichen Basteln prädestiniert. Vollkommenes ist nicht verwandelbar, Verwandlung ist aber der Kern von allem, was lebt. Genetischer Determinismus, also die Vorstellung, dass „die Gene“ haarklein alle Details einer Lebensform bestimmen, ist daher nicht nur aus ökonomischen Gründen keine sehr überzeugende Idee, sondern seinem Wesen nach zutiefst „unbiologisch“ – hier wären wir vermutlich wieder bei der dritten Ebene von Erklärung angelangt.

7. Epilog: Daimler gegen Tinguely – oder: warum Ingenieure Biologie nicht verstehen

In seinem Buch *La pensée sauvage* (1962) stellt Claude Lévi-Strauss den *ingenieur* dem *bricoleur* entgegen. Während der *ingenieur* ausgehend von einem rational durchdachten Plan *de novo* nach rationalen Überlegungen vorgeht, arbeitet der *bricoleur* mit dem, was er vorfindet und fügt dies improvisierend zusammen und zwar bezeichnenderweise so, dass diese Bausteine ihrem ursprünglichen Zweck entrückt und in einen neuen Funktionszusammenhang gestellt werden. Diese Metapher des *bricoleur*, von Lévi-Strauss zur Erklärung der unterschiedlichen Sichtweisen westlicher und „primitiver“ Kulturen entwickelt, prägte Jacobs Vorstellung, dass Natur über Gebastel funktioniere. Diese Metapher ist sehr fruchtbar – ein *de novo* kann es in der Evolution ja nicht geben, jede Übergangsform muss, wie oben ausgeführt, funktional sein und sich gegenüber der Selektion behaupten, dies wird dadurch ermöglicht, dass die Module, aus denen Baupläne entstehen (diese Module sind wohlgemerkt eigentlich rhythmisch wiederholte Aktivitäten, die auf den Raum projiziert werden) in sich selber funktional bleiben, auch wenn sie in einen neuen funktionalen Kontext gerückt werden. Gleichzeitig lassen diese Module verschiedene Funktionen zu – weil eben diese Funktion erst aus dem jeweiligen Kontext entsteht. Die *causa finalis* existiert also nicht *a priori*, sondern sie entsteht als Emergenz aus modularer Struktur und Umweltbedingungen, also *a posteriori*.

Genau an diesem Punkt unterscheidet sich die Biologie diametral vom Ingenieurwesen. Der Ingenieur versucht nämlich, auf rationale Weise und einem möglichst geraden Weg, einen zuvor entworfenen Plan (*design*) zu verwirklichen. Hier wirkt also eigentlich die *causa finalis* in reinsten Form. Der evolutive Weg zu einer neuen biologischen Funktion ist dagegen weder rational, noch gerade, noch gibt es überhaupt ein *design*. Es ist sehr aufschlussreich, sich einmal die Soziologie des sogenannten *Intelligent Design* näher anzuschauen. Zwar finden sich in dieser Welt gelegentlich auch Biologen (in der Regel freilich nicht solche, die in der Welt der Biologie erfolgreich waren), vor allem aber viele Leute aus dem Bereich Ingenieurwesen oder Software-

Entwicklung: Zum Beispiel entstand das 1999 gegründete *Discovery Institute*, das weltweit als Ideenschmiede für *Intelligent Design* gilt, auf Initiative eines Chemieingenieurs (Gene Axe), wird von einem ehemaligen Software-Entwickler bei Microsoft (Brendan Dixon) finanziert und speist sich aus Arbeiten eines ehemaligen Mathematikers (William Dembski), der von einem Professor des Ingenieurwesens (Robert Marks) als Postdoc für ein *Evolutionary Informatics* Labor angestellt wurde. In anderen Worten: Beim *Intelligent Design* handelt es sich offenbar um ein handfestes Missverständnis – der Versuch, das „Gebastel“ der Evolution über Ingenieurwesen erklären zu wollen. Auch hier bewegt man sich vermutlich wieder auf der dritten Ebene der Erklärung, wo eine diskursive Auseinandersetzung letztlich nicht zu einer Klärung führen kann, weil die eine Seite hier eine offensichtlich nicht-adäquate Setzung vorgenommen hat.

Es scheint, dass der Schweizer Künstler Jean Tinguely das Wesen der biologischen Makroevolution weit besser erkannt hat. Seine oft aus zufälligen Fundstücken zusammengesetzten Maschinen sind ganz offensichtlich das Werk eines *bricoleurs* und Tinguely ironisiert die sonst für Maschinen übliche Zweckmäßigkeit, indem er diesen Maschinen entweder paradoxen (wie bei der Maschine, die sich 1960 publikumswirksam im New York Museum of Modern Art selbst zerstörte) oder bizarren (etwa die Maschine *Meta-Max-Utopia*, gebaut 1987, deren Zweck darin besteht, einen überdimensionierten Gartenzwerg kopfüber in einem Bottich mit Wasser zu ertränken) zuführte. Weniger bekannt ist, dass Tinguelys ureigene Motivation die Schaffung von dynamischen Artefakten war (sogenannte Kinetische Kunst). Schon seine ersten Schaufensterinstallationen (1954) waren in sich selbst beweglich.

Allem, was lebt, wohnt die Fähigkeit zur Veränderung (vielleicht besser Verwandlung) inne. Das unterscheidet biologische „Bausteine“ entscheidend von den Bauteilen des Ingenieurs. Es sei zum Schluss eine kühne These gewagt: Biologische „Bausteine“ bergen *a priori* ein gewisses Maß an Autonomie (Eigenzweck) und hier liegt vielleicht auch die eigentliche Wurzel, wo sich die *causa finalis* der Biologie von der *causa finalis* des Ingenieurs unterscheidet.

8. Was zu diskutieren wäre: Erklärung oder Narrativ?

Es wäre vielleicht fruchtbar, sich anzuschauen, ob sich die Struktur der Evolutionstheorie als Erklärung von Erklärungen in anderen Wissenschaften unterscheidet. Dieser Struktur scheint eine andere Form von Zeitlichkeit anzuhaften. Vielleicht ist die Evolutionstheorie eigentlich keine Erklärung im strengen Sinne, sondern eher eine Art Narrativ?

Quellenangaben

- Britz R, Johnson GD (2012) Ontogeny and homology of the skeletal elements that form the sucking disc of remoras (Teleostei, Echeneoidei, Echeneidae). *J Morphol* 273, doi.org/10.1002/jmor.20105
- Cuénot L (1914) Théorie de la préadaptation. *Scientia* 16, 60–73
- Darwin C (1859a) Variation under domestication and under nature. In: *On the Origin of Species By Means of Natural Selection*. Kapitel 1, Murray, London
- Darwin C (1859b) Struggle for existence, natural selection, and divergence. In: *On the Origin of Species By Means of Natural Selection*. Kapitel 3, Murray, London
- Darwin C (1859c) Organs of little importance. In: *On the Origin of Species By Means of Natural Selection*. Kapitel 6, Murray, London
- Darwin C (1868) *The Variation of Animals and Plants under Domestication*, Murray, London
- Gould SJ, Vrba ES (1982) Exaptation – a missing term in the science of form. *Paleobiol* 8, 4–15
- Grbić V, Bleecker AB (1996) An altered body plan is conferred on Arabidopsis plants carrying dominant alleles of two genes. *Development* 122, 2395–2403
- Gutmann M, Nick P (2019) Modellbildung. In: Nick et al. *Modellorganismen*, Springer Spektrum, Berlin, pp 199–242
- Jacob F (1977) Evolution and tinkering. *Science* 196, 1161–1166
- Lamarck JB (1809) Dégénération et simplification de l'organisation d'une extrémité à l'autre de la Chaîne animale. In: *Philosophie Zoologique*, Buch 2, Kapitel VI, Musée d'Histoire Naturelle (Jardin des Plantes), Paris
- Lévi-Strauss C (1962) *La pensée sauvage*. Éditeur Presses Pocket, Paris
- Linnaeus C (1751) *Philosophia botanica in qua explicantur fundamenta botanica cum definitionibus partium, exemplis terminorum, observationibus rariorum, adjectis figuris aenesis*. Kiewetter, Stockholm
- Nick P, Gutmann M (2019) Biologie ist anders – warum? In: Nick et al. *Modellorganismen*, Springer Spektrum, Berlin, pp 3–37
- Schleiden MJ (1838) Beiträge zur Phytogenesis. *Arch Anat Physiol Wiss Med* 13, 137–176
- Schwann T (1839) *Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen*. Sander, Berlin

Peter Nick

Molekulare Zellbiologie, Joseph Kölreuter Institut für Pflanzenwissenschaften,
Karlsruher Institut für Technologie, Fritz-Haber-Weg 4, 76131 Karlsruhe