

aus: Sonderheft zur Epigenetik (2016), BRIEFE zur Orientierung im Konflikt Mensch - Erde, Evangelische Akademie Sachsen-Anhalt e.V., S. 16-24; zuerst publiziert in dto. Heft 113, S. 4-12

Eine neue Sicht der Evolution: Ist es nur der Zufall, der sie leitet?

von Prof. Dr. Paul Gottlob Layer

Vorbemerkung:

Nach klassischem, neodarwinistischem Verständnis der Evolution entstehen neue Organismen – von den Mikroben über Pflanzen und Tieren bis zum Menschen – letztlich durch rein zufällige Mutationsprozesse auf genetischer Ebene. Ihre Überlebenschancen werden dann durch die jeweilig herrschende Umwelt begünstigt oder unterdrückt. Die Evolution ist demnach nur vom reinen Zufall geleitet. Diese Lehre hat u. a. Jaques Monod zu seinem berühmten Bild vom Menschen als einem „Zigeuner am Rande des Universums“ veranlasst, einem überaus trostlosen Weltbild, mit dem sich alle Religionen bis heute schwer tun. Neuere Einsichten aus Entwicklungsbiologie (*EvoDevo*) und Epigenetik (s. Briefe 1/2014) haben unsere Sicht der Evolutionsabläufe jedoch deutlich erweitert. Dabei kommt der Umwelt eine lenkende Rolle zu, der reine Zufall verliert an Bedeutung. Damit lässt sich naturwissenschaftliches Verständnis wieder besser mit herkömmlichen Schöpfungsbildern versöhnen.

Der vorliegende Text wurde teilweise in ZPT (Zeitschrift Pädagogik und Theologie), Dez. 2009 (ISSN 1437-7160), S. 322-332 und in Darmstädter Echo, 24.08.2009, S. 34 publiziert.

Evolution ist ein dynamischer, teilweise geradezu explosiver Prozess.

Der wichtigste Pfeiler, der die Abstammungslehre (Evolution) zur wissenschaftlichen Tatsache macht, ist der Befund an Fossilien, also weltweite Funde versteinierter Tiere und Pflanzen aus tiefen Erdschichten, deren Alter sich mit radiometrischen Verfahren recht genau bestimmen lässt. Das Alter der Erde wird auf 4,6 Milliarden Jahre geschätzt, organisches Leben hat etwa vor 3,8 Milliarden Jahre eingesetzt. Dass die Entwicklung des gesamten Stammbaums von Tieren und Pflanzen, also die Geschichte des Lebens, jedoch alles andere als gleichmäßig während dieser ewig langen Zeiträume verlaufen ist, zeigt sich daran, dass im Verlauf der Evolution viele Tierarten ebenso plötzlich und massenhaft auftauchten, wie andere verschwunden sind. Eine fulminante Periode hat sich vor etwa 550 Millionen Jahre am Übergang vom Präkambrium zum Kambrium ereignet. Die so genannte kambrische (Arten-) Explosion hat etwa 50 Millionen Jahre gedauert und ist besonders faszinierend. An zwei Fundorten in Kanada und China konnte man dieser Epoche eine Vielzahl von Tierarten zuordnen, welche *de facto* alle Baupläne zeigten, nach denen der Systematiker die heute auch noch lebenden Tierarten gliedert: radiärsymmetrische, bilaterale, insektenartige genauso

wie auch schon wirbeltierartige. Das zeigt, dass die Entstehung der meisten Tierbaupläne wahrscheinlich innerhalb einer eher kurzen Zeitspanne (< 2% von 3,8 MrdJ) erfolgt sein dürfte. Dieses Faktum zu verstehen, gibt der klassischen Evolutionsbiologie bis heute große Rätsel auf. Die noch junge Forschungsrichtung *EvoDevo* (kurz für *Evolutionary Developmental Biology*) hilft wohl am ehesten, diesen Rätseln auf die Spur zu kommen.

Der Neodarwinismus postuliert, dass neue Tierarten durch genetischen Zufall und anschließende Selektion entstehen.

Die erste Hälfte des letzten Jahrhunderts war die Zeit der klassischen Genetik, eine Periode, die mit der Entschlüsselung der Struktur der DNA im Jahr 1953 ihren vorläufigen Höhepunkt fand. Die Chromosomen waren zuvor als Träger der genetischen Anlagen entdeckt worden. Ab den 40er Jahren wurde dann von Evolutionsbiologen die so genannte *synthetische Theorie der Evolution* – auch als *Populationsgenetik* bezeichnet – formuliert (ich gehe hier auf eine Unterscheidung zwischen *Neodarwinismus* und *synthetischer Theorie*, die meist synonym benutzt werden, nicht ein, obwohl sie strikt betrachtet angebracht wäre).

Die synthetische Theorie lässt sich wie folgt darstellen. Jedes Spermium und jedes Ei stellen je ein genetisches Unikat dar. Wenn ein Spermium mit einer Eizelle fusioniert, wird ein genetisches Individuum begründet, welches gegenüber Vater und Mutter veränderte Eigenschaften hat; z.B. könnte dieser Mensch deutlich größer als eines seiner Elternteile sein (man könnte also von einer neuen Variante bzw. Mutante sprechen). Vielleicht haben sich sogar mehrere Individuen mit ähnlichen neuen Eigenschaften gleichzeitig gebildet. Falls die Umwelt diese begünstigt, werden sich diese Individuen durchsetzen, vermehren und möglicherweise dann eine neue Art begründen (*survival of the fittest*; darwinistische Selektion). Weil ein oder wenige neue (mutante) Individuen noch nicht unbedingt eine neue Population begründen (können), hat Ernst Mayr richtig gesagt: „Das Individuum mutiert, die Population evolviert“ (Mayr, 2005). Weil dieser Wettstreit um das generationenüberschreitende Überleben nur unter vermehrungsfähigen und somit adulten Individuen stattfindet, hat man der Embryonalentwicklung in der Evolutionsbiologie keine Beachtung (mehr) geschenkt.

Dem lag auch das damals gängige Genetikverständnis zugrunde: Gene sind definierte Abschnitte der Desoxyribonukleinsäure (DNA) auf den Chromosomen. Die Gesamtheit aller Gene ist vollständig in jeder Zelle jedes Organismus vorhanden und wird als sein Genotyp bezeichnet. Zur Umsetzung der Information jedes Gens in zugehörige Strukturen bzw. Funktionen, auch als Gen-Expression bezeichnet, wird jedes Gen – so glaubte man damals – genau in ein zugehöriges Protein (Eiweißmolekül) übersetzt. Jedes Protein hat nur eine Funktion und dies drückt sich letztlich in einer Merkmalseigenschaft des Organismus aus. Die Summe aller Merkmalseigenschaften macht dann seinen Phänotyp aus, bestimmt also den

fertigen Organismus vollständig (der Phänotyp eines Lebewesens wurde damals vor allem durch sein äußeres Erscheinungsbild beschrieben, also z.B. Blütenfarbe und -form, Anzahl und Form der Finger etc.). Nach dieser Anschauung herrschte zwischen Genotyp und Phänotyp eines Individuums ein eindeutiges Eins-zu-Eins-Verhältnis, also einem bestimmten Genotyp entspricht ein – und nur ein – ganz bestimmter Phänotyp. Diese Annahme ist heute nicht mehr haltbar (Moore, 2009).

Die Synthetische Theorie hat offene Fragen übergangen.

Jede Evolutionstheorie muss erklären können, wie schier unendlich viele vermehrungsfähige Varianten durch Mutationen laufend entstanden sein können, damit sich dann die riesige Anzahl von Tier- und Pflanzenarten durch Selektion im Laufe der Evolution herausbilden konnte. Kann dies überhaupt in der recht kurzen Zeitspanne von nur 50 Millionen Jahren der kambrischen Explosion passiert sein? Während man sich kleine Übergänge mit den oben erläuterten Mechanismen erklären kann (Mikroevolution, z.B. Schnabelform bei verschiedenen Vogelarten; Flügelmusterungen bei Schmetterlingen), sind die großen systematischen Übergänge zwischen großen Tiergruppen bis heute schwierig zu verstehen (Makroevolution von Bauplänen oder Stämmen). Die Fortschritte in der Genetik und insbesondere der molekularen Entwicklungsbiologie seit den 70er Jahren haben gezeigt, dass das simple Bild der synthetischen Biologie unvollständig war.

Es ist überhaupt wissenschaftshistorisch außerordentlich erstaunlich, dass sich die neodarwinistische Sicht trotz ständiger Einwände von namhaften Paläobiologen, Embryologen und auch Genetikern in der Schulbiologie vollständig und schnell um die Mitte des 20. Jhds. durchsetzen konnte. Es ist hier nicht der Raum, um im Detail darauf einzugehen (siehe dazu Anderson, 2005). Exemplarisch sei nur an den Genetiker Richard Goldschmidt erinnert, der verlacht wurde, als er von „produktiven Monstern“ sprach und ihnen wesentliche Bedeutung bei der Makroevolution zumaß (seine Studien zu Missbildungen sind den heutigen *EvoDevo*-Ideen sehr ähnlich; s. unten), oder an die ökologischen Betrachtungen von Otto Kleinschmidt, der im Rahmen seiner Tierformenlehre darauf hinwies, dass Tierzüchtung nichts mit wirklicher Evolution zu tun hat (Darwin hatte seine Theorie aber gerade mit Blick auf die Tierzüchtung entwickelt), weil gezüchtete Rassen nur unter „Haltungsbedingungen“ erhalten werden können, in freier Wildbahn jedoch nur degenerieren (s. Beleites, 2014).

Das Problem der großen Sprünge: *EvoDevo* gibt der Evolution eine molekulare Basis

Wie könnte es also zu Makro-Übergängen zwischen großen Tiergruppen, etwa von Wirbellosen und Wirbeltieren, oder auch nur von Sauriern und Reptilien zu Vögeln, als Folge von möglichst wenigen Mutationsereignissen gekommen sein? Wo geringe genetische Veränderungen große Wirkungen haben können, dies spielt sich während der ganz frühen

Embryonalentwicklung eines Tieres oder einer Pflanze ab. Es sind bekanntlich die kleinen Vorgeschichten, welche die große Weltgeschichte ausmachen. Genauso kann man sagen: Je früher bestimmte Genwirkungen in einem Embryo auftreten, desto genereller ist ihre Wirkung für den entstehenden Organismus, je später, desto spezieller (im Prinzip i.Ü. schon von Karl v. Baer im frühen 19. Jhd. erkannt). Damit sind wir nun beim Geschäft von *EvoDevo* (Gilbert, 2013).

Der molekulare Werkzeugkasten: Gene, Signalkaskaden und molekulare Module

Die Entwicklungsbiologie fragt, wie genomische Information, welche bei der Befruchtung durch Verschmelzung von Ei und Spermium neu komponiert wurde, in lebende Strukturen umgesetzt wird. Nach der Befruchtung eines Eies geht es zunächst einmal darum, die Weichen für den Grundbauplan des zukünftigen Körpers zu stellen. Hierbei spielt die raumzeitlich regulierte Genexpression eine wesentliche Rolle. Die Aufklärung der Mechanismen der Genexpression, also wie Gene verwirklicht werden, hat gezeigt, dass 1. Gene an- und abgeschaltet werden müssen, und 2. viele Gene (besonders in der Entwicklung) nicht nur eine, sondern mehrere Funktionen haben können. Diese Genregulation erfolgt durch entsprechende Faktoren (z.B. Wachstumsfaktoren), welche aus einer Zelle selbst oder von anderen Zellen im Organismus stammen. Diese Signalvermittlung erfolgt über verschachtelte und wechselseitig voneinander abhängige molekulare Reaktionsketten. Solche Signalkaskaden bewirken, dass ein Signal nur bestimmte Zellen anspricht, und dass es in dieser Zelle schließlich bis zur DNA in den Zellkern gelangt. Hierbei haben sich eine Handvoll besonders wichtiger biochemischer Wege herausgeschält, welche unter nichts sagenden Namen wie der *Wnt*-Weg oder der *Notch-Delta*-Weg firmieren. Besonders frappierend: Man findet sie praktisch im ganzen Tier- und Pflanzenreich, und sie werden für die Vermittlung von verschiedenen Signalen in vielen und ganz verschiedenen Situationen eingesetzt. Dieser Signalaustausch zwischen den Zellen hat letztlich den Zweck, entsprechende Zielgene zu regulieren (an- und abzuschalten). Besonders bedeutend für die Frühentwicklung eines Organismus ist, dass Mastergene zentrale Prozesse im jungen Embryo steuern. So war es höchst überraschend, dass man eine Gruppe von so genannten Hox-Genen bei (fast) allen Tiergruppen finden konnte, welche hinsichtlich ihrer DNA-Sequenz untereinander verwandt sind. Sie sind sehr früh in der Evolution entstanden und wurden offenbar durch die gesamte Zeit hindurch – also über rund eine Milliarde Jahre – nur wenig verändert. Nur kleine Veränderungen solcher wichtigen Entwicklungsgene können zu drastischen Veränderungen des entstehenden Embryos führen, wie man es am Beispiel von einem spontan auftretenden zusätzlichen Beinpaar (Abb. 1) oder zusätzlichen Augen an Hühnerembryonen sehen kann.

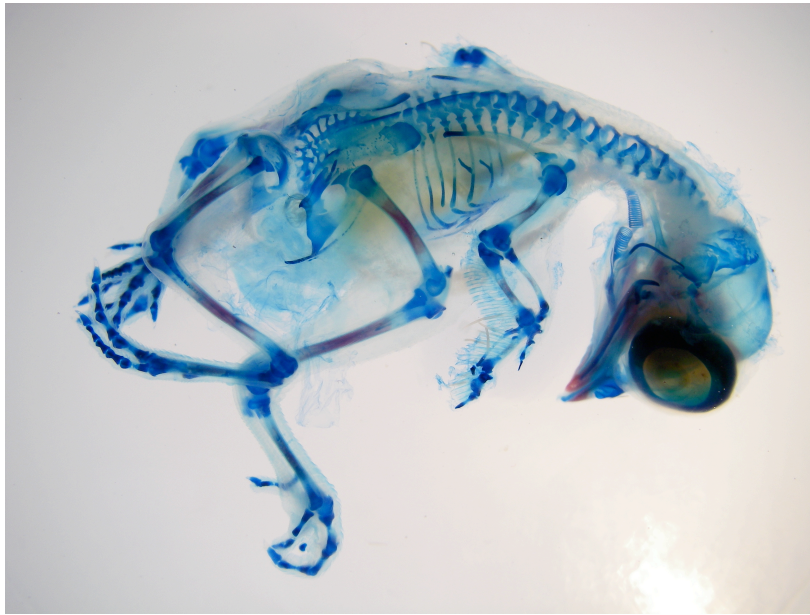


Abb 1: Ein Hühnerembryo mit zusätzlichem Beinpaar: spontan auftretende Missbildungen sind für Entwicklungs- wie für Evolutionsbiologen gleichermaßen aufschlussreich. Für derartig krasse anatomische Veränderungen sind laut *EvoDevo* nur geringe genetische Mutationen notwendig. Man beachte, dass das zusätzliche Beinpaar relativ normal ausgebildet ist. Ohne genau angeben zu können, was für diese vorliegende Mutation verantwortlich war, ist doch zu vermuten, dass die Haltungsbedingungen in der Hühnerzuchtanstalt zu Stress geführt (z.B. Hormongaben, enge Haltung etc.) und somit die Mutation begünstigt haben. Dieser Embryo wurde von Studierenden im Labor des Autors an der TU Darmstadt zufällig gefunden und präpariert.

Und in der Tat, die Entwicklung der Gliedmaßen (Beine, Arme, Flügel) bei Landwirbeltieren ist genetisch inzwischen gut aufgeklärt. Hier kann Makroevolution zum ersten Mal auf molekularem Niveau verständlich werden: Beim Übergang von echsenartigen Reptilien zu Schlangen musste einerseits „nur“ das Hox-Gen, welches die Anzahl der Rumpfsegmente (Wirbelkörper und Rippen) reguliert, vervielfacht werden (Genduplikation ist ein häufiger Prozess während der Keimzellreifung), und ferner die Bildung der Gliedmaßen in zwei Schritten unterdrückt werden. Solch mutierte „Reptilien“ sind durch Zugewinn von vielen Rumpfsegmenten und Verlust ihrer Extremitäten also zu Schlangen geworden. Beide Veränderungen konnten bei Schlangen im Vergleich zu Echsen tatsächlich nachgewiesen werden. *EvoDevo* macht also endlich plausibel, wie durch die Veränderung weniger Schalter(gene) Makroevolution möglich wird.

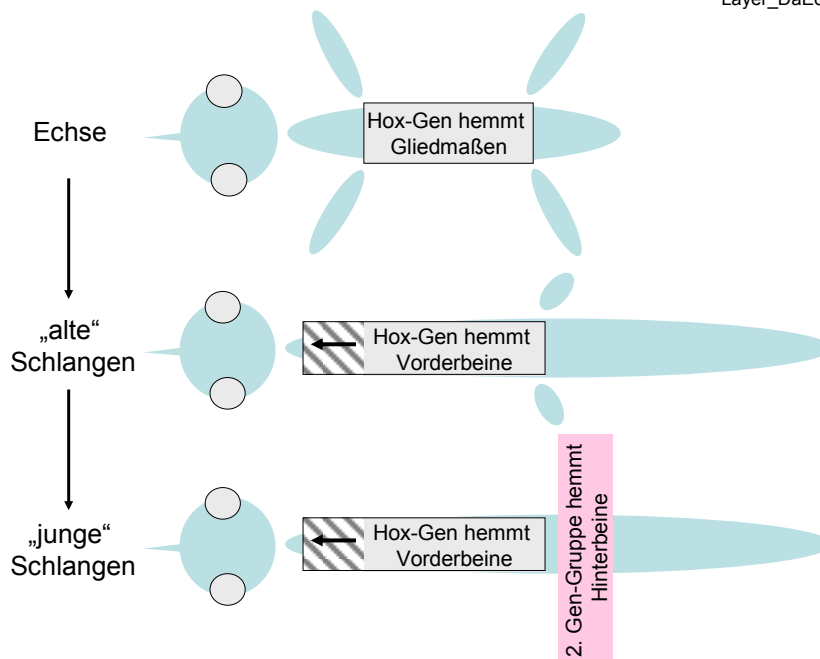


Abb. 2: Wie Schlangen während der Evolution ihre Beine verloren: Nur zwei genetische Veränderungen waren notwendig, um zunächst durch räumliche Ausbreitung der Hox-Genwirkung 1 nach vorne (Pfeil und Schraffur) die Bildung von Vorderbeinen („alte“ Schlangen, z.B. Pythons) und dann durch eine zusätzliche 2. Hox-Genwirkung (rot unterlegt) das hintere Beinpaar bei jungen Schlangen zu unterdrücken. Gleichzeitig wurde der Rumpf drastisch verlängert.

Warum hat die Umwelt Einfluss auf die Bildung neuer Organismen?

Die molekulare Entwicklungsbiologie hat uns somit gelehrt, dass die Natur mit einer sehr begrenzten Anzahl von Genen und Signalkaskaden gemäß einem Baukastensystem alle Organismen gebaut hat, welche in Jahrmilliarden der Evolution entstanden sind. Der Nobelpreisträger Francois Jacob hat in diesem Zusammenhang von *Bricolage* gesprochen, heutige EvoDevo-Forscher sprechen von einer *Toolbox*, also der Evolution als einem Spiel mit einem aus wenigen molekularen Bausteinen bestehenden Baukasten. Durch Kombination dieser wenigen genetischen Module ließen und lassen sich beliebig viele Organismen „basteln“, die wesentlich – was ihre Evolvierbarkeit angeht – durch ihren „inneren bzw. molekularen Phänotyp“ gekennzeichnet sind. Die Natur hat also nichts Wesentliches weggeworfen, und alles sieht immer noch nach einem Spiel des Zufalls aus.

Was ist nun mit dem „Basteln“ gemeint, und wie/wo kommt der Einfluss der Umwelt dabei ins Spiel? Hat dieses Spiel eventuell doch strenge Regeln, die die Macht des Zufalls begrenzen können? Zunächst muss hier angemerkt werden, dass mit Umwelt hier nicht nur ihre umgangssprachliche Bedeutung gemeint ist, also die Umwelt des ganzen Individuums in seinem ökologischen Zusammenhang, sondern Umwelt im vorliegenden Sinne beginnt schon auf der molekularen und zellulären Ebene, betrifft also die molekulare Zusammensetzung, die ein Gen an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Entwicklungszeit umgibt. So hat jedes

Molekül und jede Zelle in jedem Augenblick eine je spezifische Umgebung; es herrschen also Zustände, die sich gar nicht bis ins letzte Detail vorhersagen lassen. Man ist erstaunt, dass sich unter solchen Bedingungen überhaupt ein lebender Organismus entwickeln kann. Damit wird ein sehr weites Feld berührt, das hier nur angedeutet werden kann. *EvoDevo* hat anhand vieler Beispiele gezeigt, dass trotz all dieser Unbestimmtheiten (Zufall!) bei Weitem nicht alles, was denkbar ist, auch in der Natur geschieht (hier empfehle ich Minelli, 2009). Man spricht von „developmental constraints“, also Entwicklungsbeschränkungen, die mögliche, also überhaupt gangbare Entwicklungswege sowohl onto- wie auch phylogenetisch vorzeichnen (bzw. „kanalisieren“). Ein sehr wichtiger *Constraint* kann z.B. Stress sein. C.H. Waddington konnte 1953 etwa zeigen, dass Hitzestress während der Entwicklung von Fliegen schon nach etwas mehr als 20 Generationen zu stabilen Mutationen in den Nachkommen führt. Als Folge des Hitzestresses wurden also sehr schnell neue Varianten produziert („*genetic assimilation*“). Mit anderen Worten: Die Umwelt wirkt nicht nur selektionierend, sondern dirigierend. Diese Einsichten werden gerade durch die Befunde aus der Epigenetik ständig vertieft (z.B. Abhängigkeit der Krankheitsanfälligkeit der Nachkommen von der Lebensweise der Großeltern, etc.; s. hierzu Layer, 2014, BRIEFE 1/2014). Not macht also auch auf molekular-zellulärem Niveau erfinderisch und wirkt wie eine evolutive Triebfeder (und wie auch im normalen Leben: Die besten Ideen werden bekanntlich aus der Not geboren!). Und dies ist das wirklich Neue: Umwelt wählt nicht nur aus den zufällig entstandenen Varianten aus (das ist neodarwinistische Selektion), sondern sie kann die Produktion neuer Varianten antreiben. Auch wenn es viele Experten selbst noch nicht begreifen wollen: Dies ist eine neue Evolutionslehre!

So lässt sich die uns alle überwältigende Vielfalt in der Natur tatsächlich auf eine verborgene Einheit auf molekularem Niveau zurückführen (*deep homology*). Sie hat der große Naturforscher Goethe in seiner Beschäftigung mit dem Zwischenkieferknochen und der Urpflanze schon erahnt, wenn er sagte: „*Alle Gestalten sind ähnlich, und keine gleicht der anderen: Und so deutet das Chor auf ein geheimes Gesetz, auf ein heiliges Räthsel*“ (Goethe, 1798 in „*Metamorphose der Pflanzen*“).

Schlussbemerkungen

Die eigentliche Neuerung, die uns *EvoDevo* und Epigenetik gebracht haben, ist die Einsicht, dass es wesentlich die Umwelt ist, die einen neuen Phänotyp bestimmt (Layer, 2013). Die Umwelt selektioniert nicht nur, sondern sie dirigiert und treibt voran. Es ist nicht mehr bloß das zufällige Spiel der Gene, das unsere belebte Natur gestaltet hat und weiter gestaltet, sondern es ist das je schon Vorhandene, das Gegebene, was unsere Zukunft gestaltet. Dieser Gedanke erlöst uns vom Joch der Gene und eröffnet einen völlig neuen Blick auf das Woher und Wohin des Menschen in dieser Welt.

Prof. Dr. Paul Gottlob Layer
FG Entwicklungsbiologie und Neurogenetik
FB Biologie
Technische Universität Darmstadt
Schnittspahnstraße 13 | 64287 Darmstadt
Fon (06151) 16 -3800 | layer@bio.tu-darmstadt.de
www.bio.tu-darmstadt.de

Literaturangaben:

- Anderson, R. (2005). *The Changing Role of the Embryo in Evolutionary Thought: Roots of Evo-Devo*. Cambridge University Press.
- Beleites, M. (2013). *Umweltresonanz: Grundzüge einer organismischen Biologie*. Telesma-Verlag.
- Gilbert, S.E. (2013). *Developmental Biology*. 10th edition, Sinauer.
- Mayr, E. (2005). *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt: Vielfalt, Evolution und Vererbung*. Springer.
- Layer, P.G. (2009). Die Entwicklungsbiologie als Schlüssel zum Verständnis der Evolutionstheorie. ZPT 4/09 (Zeitschr. Pädag. Theol., ISSN 1437-7160), S. 322-333.
- Layer, P.G. (2013). „Life“ shaped by genes that depend on their surrounds. *Ann Hist Philos Biol*, Vol. 16, S. 153-170. ISSN 1863-0197, Universitätsverlag Göttingen.
- Layer, P.G. (2014). Vererbungslehre auf schwankendem Grund: von der Genetik zur Epigenetik. *Briefe – zur Orientierung im Konflikt Mensch – Erde*, Nr. 110, 1/2014, S. 5-13.
- Minelli, A. (2009). *Forms of Becoming – The Evolutionary Biology of Development*. Princeton University Press.
- Moore, A. (Hrsg., 2009). *Focus on Evolution*. Sonderheft BioEssays 7/09.