

aus: Sonderheft zur Epigenetik (2016), BRIEFE zur Orientierung im Konflikt Mensch - Erde, Evangelische Akademie Sachsen-Anhalt e.V., S. 25-33; zuerst publiziert in Heft 119, S. 40-48

## Wie Epigenetik unser Weltbild ins Lot bringen kann

von Paul Gottlob Layer

Seit der Aufklärung versucht der Mensch, Gott abzuschaffen. Der Erfolg dieses Unternehmens war und bleibt fragwürdig (Eagleton, 2015). Unter allen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen der Neuzeit hat die darwinistische Evolutionslehre dazu einen gigantischen Schub geleistet. Sie hat zweifellos die Lebenseinstellungen des modernen Menschen seit dem letzten Jahrhundert nachhaltig verändert und hat sicherlich zum dramatischen Niedergang der Kirchen in westlichen Gesellschaften viel beigetragen (Fischer, 2015). In kulturkritischer Hinsicht fällt dabei die *Zufälligkeit* der Evolution als *ein* Hauptdogma der darwinistischen Sicht ins Gewicht, d.h., daß der Ablauf der Evolution, also die Entstehung der ganzen belebten Natur (Mikroben, Fauna und Flora) von einfachsten Organismen bis hin zu einem selbstbewussten Lebewesen, dem Menschen, *rein zufällig* sei. Aus dem Postulat der Zufälligkeit leitet der Biologe auch die *Ziellosigkeit* im evolutionären Fortgang ab (Ablehnung einer *Teleologie*; d.h., eine von einfachsten Organismen bis hin zu einem mit Selbstbewußtsein ausgestatteten Menschen zielgerichtete Stammesgeschichte). Diese in westlichen Gesellschaften final akzeptierten Dogmen stehen diametral gegen jahrtausendealte Vorstellungen, die letztlich in allen Kulturen und Religionen (insb. den drei abrahamitischen) hervorgebracht wurden, daß die Natur eine Schöpfung Gottes sei, in der der Mensch das höchste, Gott-ebenbildliche Wesen sei. Die Erkenntnisse der klassischen Genetik und ihre Anwendung auf die Evolutionstheorie schienen dies endgültig widerlegt zu haben. Damit waren Gene an die Stelle von Gott getreten: Gene haben absolute Gewalt, beherrschen die belebte Natur und insbesondere uns Menschen. Sie haben je einen eindeutigen Befehl, sind unbeugsam und gerecht, wie Gott im AT. Gene können hin und wieder zufällig mutieren, kreieren dadurch *in summa* neue Lebewesen und - nach Selektion durch ihre jeweilige Umgebung, schaffen neue Welten: das neodarwinistische Weltbild. Gene sind egoistisch und kämpfen gegeneinander ums Überleben (Dawkins, 2014). Das Produkt Mensch ist, wie alle Lebewesen, nur einer ihrer zahllosen Spielbälle, ist nicht Ziel der Schöpfung, existiert vorübergehend, ein Zigeunerlein in einer unbedeutenden Ecke des Kosmos (Monod, 1992).

Es ist diese genzentrische, egozentrische, unabänderliche, sinnentleerende, konsumtreibende, traurige, trostlose, neodarwinistische Welterklärung, die durch neue Erkenntnisse der Entwicklungsbiologie, der Evolutionsbiologie und der Epigenetik wieder relativiert wird. Nicht dass

damit schon das Gegenteil, oder gar ein Kreationismus bewiesen sei, i bewahre, so gewiß nicht, aber immerhin begreift man so langsam - gerade von biologischer Seite unterstützt -, daß der Mensch nicht nur eine Gen-getriebene Maschine ist. Und man darf wieder über Transzendentes nachdenken, darf Gedanken denken, die den Menschen seit seiner Menschwerdung immer getrieben haben. Denn Menschheitsgedanken lassen sich nicht vertreiben (Eagleton, 2015), nicht durch Darwin (der dies nicht wollte), und schon gar nicht durch Dawkins (der dies will).

### ***Ein veraltetes und ein neues Genverständnis***

Die Fortschritte auf den Gebieten der Entwicklungsgenetik, der Evolutionsbiologie und der Epigenetik über die letzten etwa dreissig Jahre zu verfolgen, war faszinierend und frappierend zugleich. Weil dies in zwei vorhergegangenen Artikeln eingehender schon dargestellt wurde (BRIEFE Hefte 110, 113) sollen die wesentlichen Neuerungen aus biologischer Sicht hier nur in Kürze zusammengefasst werden.

Die herkömmliche klassische Sicht auf die Funktion von Genen, die sich gegen Ende der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts ausgebildet hatte, war eine strikt deterministische. Unter dem Ein-Gen-ein-Protein-Dogma verstanden die Genetiker, daß jedes Gen genau für ein Protein (Eiweißstoff) kodiert (= die Information zur Produktion eines Proteins), und dass jedes Gen somit eine ganz bestimmte, unverrückbare Funktion habe. Jedes Gen wäre demnach letzten Endes für eine bestimmte Eigenschaft des Organismus zuständig (Crick, 1970). Dass diese veraltete Vorstellung i.Ü. eine Unzahl von Genen voraussetzte, der Mensch aber insgesamt nur über 20.-25.000 Genen in Wirklichkeit verfügt, sei hier angemerkt und führt sie schon deshalb *ad absurdum*. Die Neodarwinisten in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts nahmen die Erkenntnisse aus der damaligen neuen Genetik mit Begeisterung auf. Mussten sie sich bisher bei ihren Betrachtungen zur Entstehung neuer Arten in der Natur vor allem mit vergleichenden morphologischen Kriterien herumschlagen, kam ihnen das o.g. Dogma gerade recht: wenn ein Gen nur eine Funktion hat, so kann man diesen Gedanken fortführen und annehmen, daß schließlich dieses eine Gen genau für eine Eigenschaft im Organismus verantwortlich sein müsse. Mit anderen Worten: für den Neodarwinisten war der Phänotyp eines Individuums (d.h., das wirklich in Erscheinung tretende, das wirkliche Tier) nur ein genaues Abbild, die kopiergetreue Verwirklichung seines Genotyps (die Summe seiner Gene, sein Genom). Ab dato mußten sich nicht mehr die Tiere selbst im Selektionsgeschehen in ihrer Umwelt durchsetzen, sondern es waren nun die "fitting genes". Dass diese dann bei Dawkins als "egoistisch" betrachtet wurden, war nicht weiter verwunderlich, wenn man eben von ihrer deterministischen Wirkweise ausgeht (s. oben) und glaubt, nur jeweils das stärkere unter ihnen könne sich durchsetzen.

Dass alle diese Annahmen eines genetischen Determinismus oft unzutreffend sind, haben wir inzwischen gelernt. Aus meiner Sicht waren es vor allem Erkenntnisse aus der molekularen Entwicklungsbiologie und Entwicklungsgenetik seit den Achtzigerjahren, die uns eine völlig neue Sicht auf die Wirkweise von Genen erschlossen haben (Layer 2014b, in BRIEFE, Heft 113). Gene enthalten die Information zur Produktion von Proteinen (Eiweißstoffen, wie Enzyme oder Strukturstoffe, etc.). Aber diese Information wird nicht ständig übersetzt. Es ist wie bei einem Computerprogramm, das auch erst durch Aktivierung benutzt werden kann. Gene werden also reguliert, d.h. sie können angeschaltet und wieder abgeschaltet werden, so, wie wenn wir eine bestimmte „App“ anklicken. Durch hoch vernetzte Regelmechanismen können aus einem Gen mehrere Proteine hergestellt werden. Ganz besonders wichtig sind Rückkopplungsprozesse der Genaktivierung, d.h. bestimmte Proteine wirken nach ihrer Herstellung sofort wieder auf die DNA zurück und können weitere Gene anschalten oder abschalten. Solche Gen-Protein-Gen-Kaskaden konnte man besonders eindrucksvoll bei der Bildung des frühen Embryos studieren. Am Beispiel der Embryonalentwicklung der Fruchtfliege *Drosophila* läßt sich eindrucksvoll zeigen, wie nach der Befruchtung zunächst ganz wenige Gene, und dann mehr und mehr Gene dem frühen Embryo zunächst räumliche Koordinaten vermitteln, ihn in vorne-hinten (anterior-posterior), oben-unten (dorsal-ventral) und rechts-links organisieren, wonach auch schnell eine Längsuntergliederung des ganzen embryonalen Körpers in vierzehn Segmente erfolgt (Nüsslein-Volhard, 2004). Jedes beteiligte Gen ist hierbei schnell in komplexe Wirkungsnetzwerke eingebunden und führt zu verschiedenen Entwicklungsstadien völlig verschiedene Funktionen aus. Es wird auch dem geeigneten Laien nun verständlich geworden sein, daß dieses neue Genverständnis nichts mit dem klassischen einfachen 1Gen-1Protein-Genmodell zu tun hat. Es gibt tatsächlich namhafte Genetiker, die dafür plädieren, gar nicht mehr von "dem Gen" zu sprechen, weil es je nach Betrachtung so viele Bedeutungen haben kann (Moore, 2009).

Etwa zeitlich parallel zu den immensen Fortschritten in der Entwicklungsgenetik haben sich Stimmen von Evolutionsbiologen mit dem Hinweis gemeldet, daß die Standarderklärungen des Neodarwinismus zur Makroevolution nicht ausreichend sind (Gould, 2004). Wie kann man sich die ganz großen Sprünge in der langen Stammesgeschichte vorstellen, wie also etwa die völlig verschiedenen Baupläne von Wirbeltieren (Vertebrata) und Gliederfüßern (Arthropoda) abstammungsmäßig miteinander verbinden? Während sich der klassische Neodarwinist ausschließlich für die reproduktionsfähigen Adultformen von Tieren und die Fitness ihrer Gene interessierte, hat man sich nun wieder darauf besonnen, daß neue, variante Formen nur über mutationsbedingte Veränderungen während der Embryonalentwicklung überhaupt auf der Weltbühne erscheinen können. Aus der Entwicklungsgenetik hat sich der blühende Forschungszweig des *EvoDevo* entwickelt (steht für *Evolutionary Developmental Biology*), der inzwischen anhand vieler

Detailbeispiele erklären kann, wie durch minimale genetische Veränderungen an entwicklungsrelevanten Genen wesentliche makroevolutionäre Sprünge erfolgt sein könnten (Anderson, 2005). Man stellt Fragen wie etwa "Warum haben Insekten immer sechs Beine, und nicht mehr, wie viele andere Gliederfüßer?". Mit *EvoDevo* erklären wir das Evolutionsgeschehen nicht mehr mit dem darwinistischen Schlagwort "*Survival of the Fittest*", sondern treffender mit "*Arrival of the Fittest*" (Gilbert, 2013).

Eine weitere, hoch aktuelle Forschungslinie spielt in diese Betrachtungen mit herein, ja, oft wird heute all das oben Gesagte unter ihrem Label verhandelt. Es ist dies die Epigenetik (epi, griech. darüber liegend). Sie speist sich aus zwei unterschiedlichen Quellen, die bis heute noch ihre Hauptforschungsfelder kennzeichnen (Layer, BRIEFE 2014, Heft 110). Zum einen hatten Epidemiologen, vor allem in Finnland, durch generationenübergreifende Vergleiche herausgefunden, daß das Auftreten bestimmter körperlicher Eigenschaften, insb. auch bestimmter Krankheiten, in Nachkommen der ersten bzw. auch zweiten Generation von den Ernährungseigenschaften/Lebensverhältnissen ihrer elterlichen bzw. großelterlichen Generation abhängen können. Dies war überraschend und passte in keiner Weise zu den Dogmen der gängigen Fortpflanzungsgenetik. Seit A. Weismann galt als Dogma, daß die genetische Information in reifenden Geschlechtszellen (in der sog. menschlichen Keimbahn) von ihrer Umgebung absolut unbeeinflusst sei. Wenn dann durch Fusion von Ei und Spermium das Genom des Nachkommens gebildet wird, so dürften darauf Ernährungslage oder Lebensstil der beiden Eltern keinerlei Einfluß haben. Die besagten Befunde, von denen es inzwischen eine Vielzahl bei Mensch und Tieren gibt (Kegel, 2015), zeigten aber gerade dies.

Der zweite Anstoß zur Epigenetik kam aus der Molekularbiologie/Genetik und liefert, zumindest ansatzweise, eine Erklärung für die obigen Befunde auf molekularem Niveau. Die DNA und auch die sie umgebenden Hüllproteine (Histone) sind nämlich nicht inert (soz. nackt und unberührt), sondern an bestimmten Stellen können chemische Gruppen angehängt werden; sie werden dabei *acetyliert* oder *methyliert*. Solche Prozesse legen bestimmte Gene still oder aktivieren sie, und tragen auf diese Weise zur längerfristigen Stabilisierung des Genaktivitätsstatus in den vielen verschiedenen Zelltypen, und damit im ganzen Körper bei. Und eben solche chemischen Modifikationen an der DNA können auch in reifenden Keimzellen erfolgen, und können offenbar - das war aufgrund des Weismann-Dogmas anfangs wirklich unglaublich - bei der Befruchtung von Ei durch ein Spermium unverändert in die nächste Generation übertragen werden.

### ***Zurück zu neuen Weltansichten***

Weiter soll an dieser Stelle nicht in dieses hoch aktuelle Forschungsfeld eingedrungen werden (nochmals der Hinweis auf das hervorragende Buch von B. Kegel, 2015, sowie auf meine früheren Beiträge in BRIEFE, Layer 2014a, b). Wichtig ist hier einzig, daß sich mit diesen umwälzenden Erkenntnissen aus der molekularen Entwicklungsbiologie und nun der Epigenetik sich der Blick auf die Wirkung von Genen wie auch auf das Evolutionsgeschehen grundsätzlich verändert. Gene sind in ihrer Wirkung durchaus nicht autonom und auch nicht eindeutig. Was sie in unserem Körper, insbesondere aber dann auch in den Körpern unserer Nachkommen anstellen, hängt durchaus von unserer Lebensweise ab. Was wir essen, wie viel wir trinken, ob wir rauchen, Drogen nehmen, welche Krankheiten wir mit uns herumschleppen, uvm., alles dies kann sich möglicherweise positiv oder negativ in unseren Kindern und Kindeskindern auswirken. Man ist an Mose 4, 20xx erinnert, wo es heißt, daß die Schuld der Väter sich bis ins vierte Glied fortsetzt.

Kommen wir zurück zum deterministischen Genkonzept (Genozentrismus). Es ist kein Zufall, daß sich die deterministische Denkweise nicht nur in die Evolutionslehre hinein ausgebreitet hat. Sie paßt(e) in unsere heutige Welt. Auch in der Hirnforschung hat sie ihre Anhänger gefunden. Aufgrund bestimmter einfacher neurophysiologischer Beobachtungen haben namhafte Neurobiologen die These aufgestellt, daß, wenn der Mensch meint, etwas aus freien Stücken getan zu haben, sein Gehirn die jeweilige Aktion autonom ausgelöst hätte; d.h. dem Menschen wird damit sein freier Wille abgesprochen. Hat der Mensch keinen freien Willen, dann hat er natürlich auch keinerlei Verantwortung; ebenso keine Schuldfähigkeit. Auch hier dieselbe Idee, als wären Organismen, und vor allem auch der Mensch, letztlich nichts als gesteuerte Maschinen. Nicht der Geist sei autonom, sondern die Physis.

Eine Neubewertung zweier winziger Worte der Evolutionslehre könnten den evolutionsphilosophischen Diskurs neu ausrichten. Es sind dies die Worte "rein zufällig" und "richtungslos", die nach wie vor Grundaussagen in jedem (deutschen) Standardlehrbuch zur Evolutionslehre sind. Nun darf man wieder fragen, wie zufällig der Verlauf der Stammesgeschichte (Phylogenese) tatsächlich war, bzw. wie sehr wird er durch die jeweils herrschende Umwelt gesteuert/getrieben. Im ursprünglichen Verständnis wurden die im "Körperinneren" (z.B., nur auf der Ebene der DNA) des Individuums ablaufenden Mutationsprozesse dabei als unabhängig von ihrer Umwelt angesehen. Erst der zweite Schritt, die Selektion der "fittesten" Individuen, war demgemäß umweltabhängig. Nach dem neuen "epigenetischen" Verständnis aber müssen wir anerkennen, daß neue Formen mit durch die Umwelt herbeigeführt werden, also die Mutationen nicht nur „intern“ und rein zufällig auftreten. Somit werden Faktoren wie die Nahrungslage, Klima, Wetter, Naturkatastrophen, Krieg

und Frieden, Lebensverhältnisse, etc. zu wesentlichen Triebkräften der Evolution. Weil damit die Zufälligkeit eingeschränkt ist (bzw. externalisiert wird), kann auch die völlige Richtungslosigkeit der Evolution (Teleologie), ein weiteres Dogma aus den geltenden Lehrbüchern der Evolutionslehre, durchaus wieder zum Diskurs gestellt werden (ein philosophisch hoch spannendes Thema, das hier nicht vertieft wird). Wohlgedenkt, wir haben damit sicherlich keinen Beweis, daß die Evolution gerichtet war/ist, aber der scheinbar existente Gegenbeweis, die Zufälligkeit und damit die Richtungslosigkeit des ganzen Geschehens, scheint mir abhanden gekommen zu sein.

Die hier angesprochenen, vielleicht zunächst als minimal erscheinenden Erkenntnisse werden meiner Einschätzung nach immense Auswirkungen auf unser Weltverständnis, unser ganzes Geistesleben haben. Sie dürften geistig-kulturelle Folgen mit sich bringen, die noch nicht von einer Öffentlichkeit erkannt sind. Seit der Aufklärung versucht der Mensch, Gott abzuschaffen. Aber, wie der bekennende Atheist Eagleton ernüchtert feststellt, will ihm dies irgendwie nicht gelingen; und wenn am Ende der gegenwärtigen Postmoderne eventuell doch, dann unter Verlust seines letzten Bisschens an Kultur (Eagleton, 2015). Das 20. Jahrhundert war das Jahrhundert des unhinterfragten Darwinismus, als größtem wissenschaftlichen Durchbruch stets gefeiert, aber auch mit teils verheerenden gesellschaftlichen Folgen, wenn wir an die Rassenlehre in Kombination mit dem Sozialdarwinismus denken. Sie waren es, die den Weg in den Holocaust wissenschaftlich unterfüttert haben. Die christlichen Kirchen waren von Anfang an von der Evolutionslehre im Kern ihrer Mission betroffen, denn Gott als Schöpfer der belebten Natur war damit gestorben. Unzählige Synoden, Konzile, Akademien ziehen sich durch das letzte Jahrhundert, ganze Bibliotheken voll mit Schrifttum haben sich mit einer religionsverträglichen Integration des darwinistischen Modells herumgeschlagen (oder eigentlich: einer Integration der Glaubensverkündigung in den Darwinismus). Je nach Ausrichtung haben sie geistige Verrenkungen vollführt und oft krampfhaft Kompromisse eingegangen, um sich dem scheinbar unverrückbaren Gedankengebäude der Evolutionsbiologen unterzuordnen. Oder, am anderen Ende des Spektrums, haben die Naturwissenschaften schlicht negiert und sind den kruden Ideen einer wortgetreuen Auslegung der Bibel in Form von Kreationismus und Intelligent Design erlegen. Beiderseits hat dieser Kulturkampf zumindest hierzulande die Kirchen an den Rand ihrer Existenz und, wenn nicht zum Verlust, dann doch zu einer zweifelhaften Verweltlichung ihrer Glaubensmission geführt (Fischer, 2015).

Und nun sieht die biologische Welt, schaut man nur genau genug hin, auf einmal wieder viel verträglicher, weil weniger deterministisch aus. Was für mich im Rückblick besonders erstaunlich daran ist, wie vollständig sich die neodarwinistische, genzentrische Sicht nicht nur in Wissenschaftlerkreisen als "letztendliche, unverrückbare Wahrheit" durchsetzen konnte, sondern

wie effektiv sie sich im Bewusstsein der Allgemeinheit unserer westlichen Gesellschaften - sozusagen als *Theory of Everything* - breit machen konnte. Es hat wohl damit zu tun, daß die simplen Populäraussagen , à la *survival of the fittest*, besonders gut in unsere kapitalistische Welt gepasst haben. Gene sind einfach cool; man schaue sich nur die Werbung an (Bsp., das 911er Gen). Der genetische Determinismus ist zur Basis und Rechtfertigung unserer leistungsversessenen Konsumgesellschaft geworden. Kapitalismus, nur das Kapital zählt. Es geht immer um den Stärkeren, der den Schwächeren verdrängt, egal mit welchen Mitteln. Das Spiel mit Zahlen, mit dem großen Geld; das Geld ist immer der Stärkere. Wer hat, der hat. Der es hat, verdrängt den, der weniger davon hat. Nicht Qualität, nur Quantität zählt. Das Wort vom "Geld verdienen" hat längst seinen Sinn verloren; Geld wird "gemacht", am schnellsten kann dies der Computer. Turbokapitalismus. Globalisierung. Gegen-die-Wand-fuhrwerken. Alles dies scheint die Natur selbst zu rechtfertigen.

Wir Menschen sollten immer skeptisch aufhorchen, wenn irgendjemand mit endgültigen Wahrheiten daherkommt, egal ob dies aus der Ecke arroganter, alleswissender Wissenschaftler oder von religiösen Fanatikern kommt. Der strikte Darwinismus im Sinne von "Survival of the Fittest" wurde lange als unverrückbare Wahrheit verkauft und hat doch unendlich viel Leid und gesellschaftliche Fehlhaltungen (s. Turbokapitalismus) befördert. Der Einfluß der Umwelt auf die Entstehung der belebten Natur ist viel bedeutender, als bisher gedacht (Layer, 2013; Kegel, 2015). Es macht hoffnungsfroh, daß postmoderne Naturwissenschaften insgesamt viel mehr die Bedeutung von Unbestimmtheiten (Instabilitäten) im Walten der Natur erkennen (Schmidt, 2015; kurz in Layer, 2015), was auch ein Zeichen ihrer Selbstbescheidung sein kann. Wissen und Glauben sind zwei verschiedene Kategorien (Bangert, 2012). Kirchen, wenn sie überleben wollen, müssen sich eigenständig und selbstbewusst um unseren Glauben, weniger um unser doch so begrenztes Wissen kümmern.

#### **Literatur:**

- Anderson, R. (2005). *The Changing Role of the Embryo in Evolutionary Thought: Roots of Evo-Devo*. Cambridge University Press.
- Bangert, K. (2012). *Die Wirklichkeit Gottes: Wie wir im 21. Jahrhundert an Gott glauben können*. Philia-Verlag.
- Crick, F. (1970). Central dogma of molecular biology. *Nature* 227, 561-563.
- Dawkins, R (2014). *Das egoistische Gen*. 2. Aufl., Springer-Spektrum.
- Gilbert, S.F. (2013). *Developmental Biology* (10th edit.). Sinauer Ass. Inc.
- Eagleton, T. (2015). *Der Tod Gottes und die Krise der Kultur*. Pattloch.
- Fischer, H. (2015). *Sind die Kirchen noch zu retten? Die europäischen Christen vor den Herausforderungen durch den Kulturwandel*. BoD Books on Demand, Norderstedt.
- Gould, S.J. (2004). *Illusion Fortschritt: Die vielfältigen Wege der Evolution*. Fischer Taschenbuch-Verlag.
- Kegel, B. (2015). *Epigenetik. Wie Erfahrungen vererbt werden*. 2. Aufl. Dumont.
- 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, PG (2014a). Vererbungslehre auf schwankendem Grund: Von der Genetik zur Epigenetik. BRIEFE der Evang. Akademie Sachsen-Anhalt e.V., Heft 110, S. 5-13.
- Layer, PG (2014b). Eine neue Sicht der Evolution: Ist es nur der Zufall, der sie leitet? BRIEFE der Evang. Akademie Sachsen-Anhalt e.V., Heft 113, S. 4-12.
- Layer, PG (2015). "Das Andere der Natur" (Eine Abhandlung über das gleichnamige Buch von JC Schmidt im Hirzel-Verlag, 2015). UNIVERSITAS, 70. Jhrg., Nr. 830, S. 62-73.
- Mayr, E. (2005). Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt: Vielfalt, Evolution und Vererbung. Springer.
- Monod, J. (1992). Zufall und Notwendigkeit. Philosophische Fragen der modernen Biologie. Piper-Verlag.
- Moore, A. (Hrsg., 2009). Focus on Evolution. Sonderheft BioEssays 7/09.
- Nüsslein-Volhard, Ch. (2004). Das Werden des Lebens: Wie Gene die Entwicklung steuern. C.H. Beck-Verlag.
- Schmidt, J.C. (2015). Das Andere der Natur. Hirzel-Verlag.