

Die „Graphentheorie“ beschäftigt sich damit, komplexe Zusammenhänge graphisch verständlich aufzubereiten. Das auf dieser Seite abgebildete Spinnennetz mit seinen zahllosen mehr oder weniger winzigen Tautröpfchen könnte man als einen speziellen Graphen interpretieren, bei dem „Verknüpfungen“ oder „Beziehungen“ der einzelnen Tröpfchen in Form von Fäden eingetragen sind. Allerdings könnte es kein Stammbaum der Evolution sein, denn dort gibt es – zumindest im Tierreich – eine „eherne Regel“: Wenn einmal eine Verzweigung in zwei Äste stattgefunden hat, gibt es keine weiteren Querverbindungen zwischen diesen Ästen. Im Gegensatz dazu ist der Graph links, der das Terminieren des rekursiven Algorithmus von Lothar Colatz veranschaulicht, auch im evolutionsbiologischen Sinn „stammbaumtauglich“.

Die Paläontologie als Zeitfenster in die Vergangenheit

Schon zu Zeiten *Lamarcks* (1744-1822) war bekannt, dass sich Organismen im Laufe der Zeitgeschichte geändert haben. Mithilfe der Paläontologie ließ sich zeigen, dass in den ältesten Gesteinsschichten nur sehr ursprüngliche Tiere vorkommen, Wirbeltierreste in den nachfolgenden Schichten zu finden sind und Säuger- und Vögelreste erst in den jüngsten Zonen auftauchen. Die Gesteinsschichten, die heute mit modernen Methoden exakt datierbar sind, liefern ein Zeitfenster in die Vergangenheit. Doch selbst *Lamarck* konnte in seinem Werk aus dem Jahr 1809 lediglich die Existenz evolutionärer Vorgänge aufzeigen, deren Ursache jedoch nicht erklären.

Evolution ist die Veränderung von Organismen in der Zeit, verursacht durch Selektion

Charles Darwin erklärte schließlich 50 Jahre später die evolutiven Veränderungen und deren Kausalfaktoren:

1. *Biologische Evolution* bedeutet, dass sich alle Populationen von Organismen mit der Zeit verändern.
2. Die evolutiven Veränderungen finden ausschließlich in kleinen Schritten statt. Deren Größe entspricht der Veränderung zwischen Eltern und ihren Nachkommen.
3. Eine Vervielfältigung von Arten besteht in der Aufspaltung von stammesgeschichtlichen Linien. Sie findet zusätzlich zu den evolutiven Änderungen innerhalb dieser Linien statt.
4. Der Mechanismus, der die Verbreitung von Mutationen steuert und sich in der Stammesgeschichte abbildet, ist die *natürliche Selektion*, die Darwin als Analogie zur *künstlichen Selektion* bei der Zucht von Haustieren und Agrarpflanzen gesehen hat.
5. Alle Organismen stammen von einem gemeinsamen Vorfahren ab. Die Mannigfaltigkeit der Organismen ist das Produkt einer stammesgeschichtlichen Entwicklung, die im Laufe der Jahrmillionen nach einer Etablierung des Lebendigen (*chemische Evolution*) aus einer Stammart heraus folgte. Daher sind alle Organismen miteinander verwandt.

Etablierung der Selektionstheorie

Die Thesen *Darwins* waren und sind die einzige wissenschaftlich überprüfbare Position gegenüber „Schöpfungsmythen“ (etwa die Genesis oder auch andere weltweit verbreitete Mythen), die wiederum meist von einmaligen Schöpfungsakten

und anschließender Konstanz der Arten ausgehen. Bekanntermaßen rief dies eine bis heute anhaltende Diskussion hervor, die aber auf weiten Strecken nichts mit Wissenschaft zu tun hat.

Künstliche Selektion: Gezieltes Warten auf Mutationen

Darwin ging davon aus, dass ähnlich wie in der Tier- und Pflanzenzucht seiner Zeit durch Auslese eine Veränderung der Zuchtgruppen zur Verbesserung biologischer und ökonomischer Eigenschaften erreicht werden kann. Es wurden damals (und werden heute noch) jene Individuen, die mehr oder weniger zufällig bereits einige der Wunscheigenschaften besaßen, selektioniert und allein zur Weiterzucht verwendet. Durch erneute Auslese von deren Nachkommen für den nächsten Züchtungszyklus konnte man sich allmählich dem Zuchtziel nähern. Die damaligen Züchter warteten in ihren „Proben“ auf sogenannte „hot spots“, mit denen dann weiter gezüchtet wurde. Jene „hot spots“ waren, wie wir heute wissen, Mutationen, also in den Keimzellen etablierte erbliche Veränderungen.

Natürliche Selektion: Unterschied im Vermehrungserfolg von Individuen

Darwin erkannte, dass in der Natur im Prinzip nichts wesentlich Anderes abläuft. Natürliche Selektion ist der Unterschied im Vermehrungserfolg von Individuen einer Population aufgrund unterschiedlicher genetischer Eignung (engl. *fitness*). Dieser Unterschied ist allerdings kein Zufall, sondern eine Konsequenz der genetischen Konstitution der sich fortpflanzenden Organismen, und wirkt auch bei natürlichen Populationen auf die genetische Ausstattung der Folgegenerationen. Diejenigen Individuen, die mehr Nachkommen produzieren als andere, erhöhen damit die Individuenzahlen mit ähnlichem Erbgut.



Survival of the fittest: Erfolgreichere Mutanten verdrängen allmählich die weniger erfolgreichen

Da Populationen im Schnitt konstante Größen haben, bedeutet dies, dass durch die erfolgreichere Vermehrung bestimmter Individuen jene genetischen Eigenschaften, die weniger Nachkommenschaft produzieren, automatisch seltener werden. Darwin nannte dies „*survival of the fittest*“, was etwas unglücklich mit „Überleben des Stärksten“ oder auch „Kampf ums Dasein“ übersetzt wurde. Es geht nämlich nicht um einen Kampf mit Zähnen und Klauen, sondern um einen Wettstreit um höheren oder niedrigeren Fortpflanzungserfolg. Dies mag vergleichbar sein mit einem 100-Meter-Lauf, bei dem nicht der Stärkste



Biotische und abiotische Selektionsfaktoren

Die natürliche Selektion erfolgt durch die Umwelt mit ihren biotischen und abiotischen Faktoren: Zu abiotischen Faktoren gehören Temperatur, Feuchtigkeit usw., biotische Faktoren sind die Wechselwirkungen mit den anderen Organismen, allen voran mit der Konkurrenz um Ressourcen.

Sexualität mit zwei Geschlechtern und Reduktionsteilung

Selektion kann jedoch nur greifen oder wirksam werden, wenn die Individuen einer Population nicht gleich sind, sich also in genetischen Eigenschaften unterscheiden. Ein „Trick“ der Natur war hier bereits früh in der Stammesgeschichte der Organismen die Erfindung der Sexualität mit zwei Geschlechtern, verbunden mit dem Zellvermehrungsmodus der Reduktionsteilung (Meiose). Dies ist eine besondere Form der Zellkern-Teilung, bei der im Unterschied zur gewöhnlichen Teilung bei Körperzellen (Mitose) die Zahl der Chromosomen erst halbiert und dann neu kombiniert wird. Damit einher geht eine Neuzusammenstellung der Eltern-Chromosomen.

gewinnt – oder gar jener, der seine Mitstreiter durch Gewalt beseitigt – sondern eben der, der am schnellsten gelaufen ist. Biologisch würde dies sehr vereinfacht bedeuten, dass der Gewinner oder die Gewinnergruppe allein sich vermehren kann und sich bei der Folgegeneration wiederum nur die Schnellsten weiter fortpflanzen werden.



Praktisch unendlich viele unterschiedliche Keimzellen

Das Ergebnis der Reduktionsteilung mit der Mischung der elterlichen Erbanlagen sind die Keimzellen (Gameten). Das hat eine interessante Konsequenz: Bei einer Annahme von etwa 1000 Strukturgenen mit je zwei Ausprägungen eines Gens (Allele), das sich an einem bestimmten Ort (Locus) auf einem Chromosom befindet, gibt es 2^{1000} (das ist eine Zahl mit mehr als 300 Stellen!) Kombinationsmöglichkeiten. Diese Zahl ist unvorstellbar groß.



Selektion ist zwar ein statistischer Prozess, aber geradezu das Gegenteil von Zufall

Zusätzlich kommen Mutationen ins Spiel und erhöhen die Variationsmöglichkeit erneut. Für das Wirken von Selektion bedeutet dies, dass diese umso mehr auf eine unerschöpfliche genetische Vielfalt zurückgreifen kann. Selektion ist allerdings ein statistischer Prozess, bei dem, ähnlich wie beim Würfeln, nicht der Einzelfall zählt. Zufällig in diesem Geschehen ist lediglich das Angebot an Varianten, nämlich welche Strukturgene in der Reduktionsteilung kombiniert werden bzw. welche Mutationen entstehen. Weitab von Zufall ist jedoch, welche dieser Varianten dann im Fortpflanzungsgeschehen den größten Erfolg erzielen.

Evolution optischer Sinnesorgane

Wenn also der Besitz von besseren optischen Sinnesorganen dem Individuum einen relativen Überlebensvorteil verschafft, so



Bereits jede Eizelle und jedes einzelne Spermium sind ein Unikat

Umgemünzt auf die Frage, wie viele genetisch verschiedene Spermien ein Mann pro Erguss mit mehreren hundert Millionen Spermien produzieren kann, bedeutet dies, dass hier kein einziges Spermium genetisch gleich ist. Nicht einmal im gesamten Leben dieses Mannes, oder auch bei all den Milliarden von Männern dieser Erde zusammen wird je wieder ein genetisch gleiches Spermium produziert. Gleiches gilt für die Eizellen der Frau. Man sieht hier, dass allein die Rekombination eine Quelle von praktisch unendlicher Variationsmöglichkeit ist.





führt dies zu einer statistisch höheren Anzahl an Nachkommen, welche wiederum die erfolgreiche Eigenschaft vererben. Ist der Selektionsdruck groß (etwa die Schnelligkeit und Präzision, mit der ein Fressfeind erkannt werden kann), so werden sich gute optische Sinnesorgane nicht nur schnell in der Population durchsetzen, sondern auch stets verbessern.

Kanalisierende Rahmenbedingungen

Welche Augen in diesem Prozess entstehen, hängt von allerlei Vorbedingungen ab und natürlich auch davon, in welcher Umwelt der betreffende Organismus lebt. Stets wirken physikalische Gesetzmäßigkeiten als kanalisierende Rahmenbedingungen, da z. B. bei der Herstellung einer scharfen Abbildung auf einer Retina die Gesetze der Strahlenoptik in Kraft treten. So sollten Augen, die nachts zum Einsatz kommen, anders konstruiert sein als solche für den Tag.



Die sukzessive Evolution von verschiedenen Augentypen

Wie später noch genauer erläutert wird, mussten zur Realisation einer Lichtwahrnehmung und der Weiterverarbeitung in einem Nervensystem in der frühen Stammesgeschichte sukzessive Mittel und Konstruktionen für diesen Zweck gefunden werden. Tatsächlich kann man über Vergleiche verschiedener Lösungen bei unterschiedlichen Tierarten eine Reihenfolge aufstellen, vom einfachsten Ansatz bis hin zu ausgefeiltesten Linsenaugen.

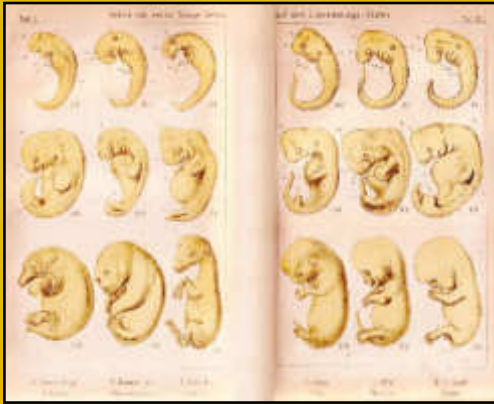
Die Hell-Dunkel-Erkennung

Die einfachste Lösung ist eine einzelne Zelle, die bereits ein photosensibles Proteinpigment besitzt. Photorezeptoren nehmen Licht wahr, indem sie die Energie des einfallenden Lichtreizes mit einem „Sehfarbstoff“ (Rezeptor-Protein) absorbieren; dieser verändert seine Konformation (räumliche Anordnung der drehbaren Bindungen an den Kohlenstoff-Atomen). Es wird eine Signalübermittlung aktiviert, bei der sich in der Membran befindliche Ionenkanäle öffnen oder schließen, was dann zu einer Veränderung des Membranpotenzials in der Photorezeptorzelle führt. Solche einzelnen Zellen können zunächst nur Hell und Dunkel oder einfache Beschattung wahrnehmen.

Kombination von Modulen

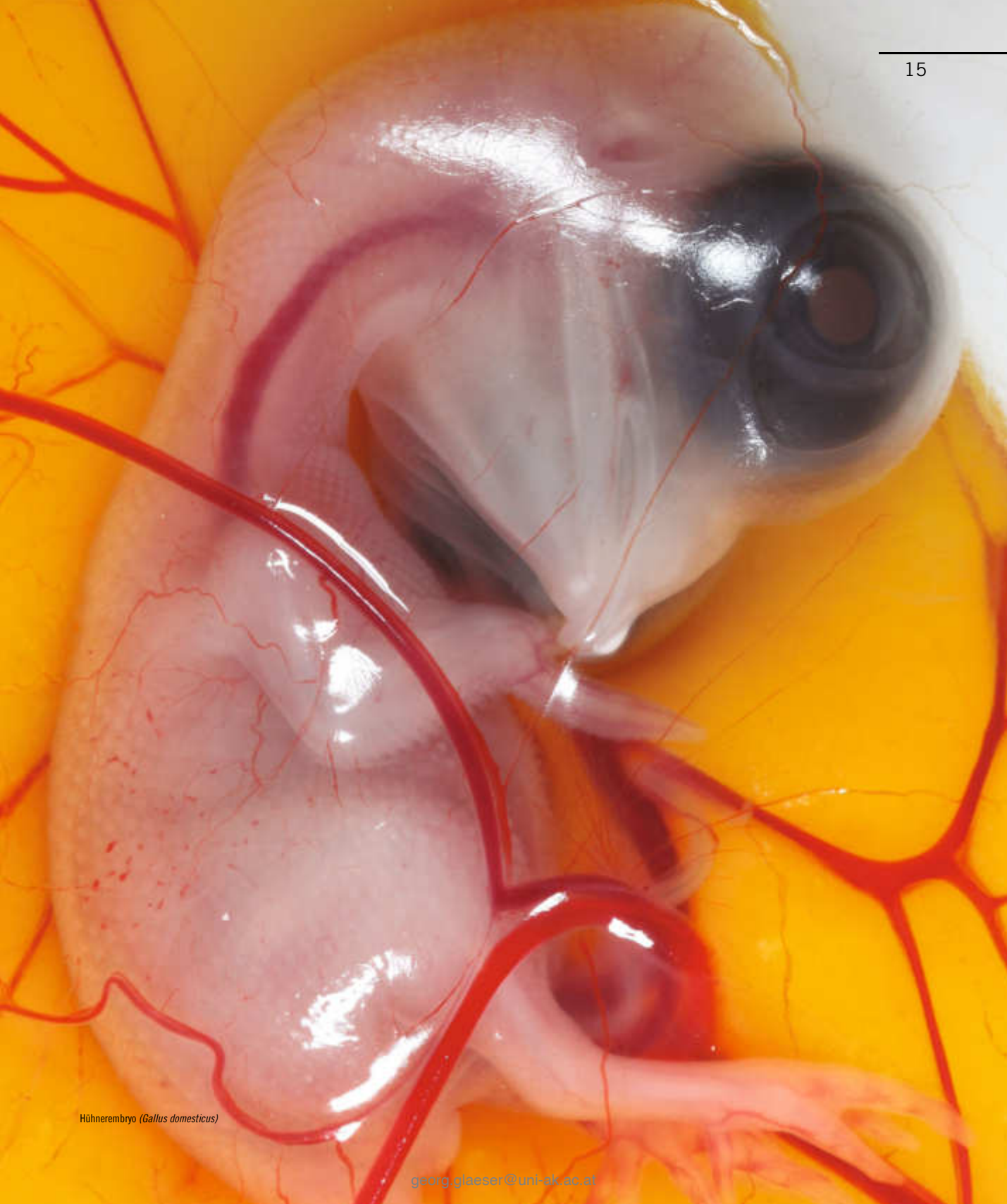
Wenn man nun mindestens eine weitere Zelle mit einem Licht absorbierenden Pigment hinzufügt, kann direktionales Licht erkannt werden. Diese Grundausstattung aller späteren Augentypen wurde tatsächlich bereits früh in unserer Stammesgeschichte „erfunden“. Auf diesem „Modul“ aufbauend konnten immer wieder, zum Teil völlig unabhängig voneinander, verschiedene Augentypen entstehen.

Der Embryo macht alle Stadien durch



Der deutsche Zoologe *Ernst Haeckel* (1843-1919) war einer der ersten starken Verfechter des darwinschen Evolutionsgedankens im deutschsprachigen Raum und hat diesen zu einer speziellen Abstammungslehre der Tiere ausgebaut. Haeckel war vor Allem vergleichender Anatom und griff u. A. die Beobachtungen des estnischen Naturforschers, Anthropologen, im Speziellen Embryologen *Karl Ernst von Baer* auf, laut denen die Embryonen verschiedener Wirbeltiere sich erstaunlich ähneln. *Haeckel* formulierte durch Ausbau dieser Erkenntnis den bis heute zitierten Satz, dass die Ontogenese die Phylogenie rekapituliere. Er ging als „Biogenetische Grundregel“ in die Literatur ein. *Haeckel* postulierte damit, dass es einen evolutionskausalen Zusammenhang zwischen der Embryonalentwicklung und der Stammesgeschichte dieser Tiere gebe. Er stellte in einer bis heute berühmten Tafel die Embryonalstadien von acht verschiedenen Wirbeltieren,

vom Fisch über Amphibien, Reptilien, Vogel bis zum Mensch dar. Seine Aussage war, dass sich alle diese Embryonen in einer frühen Phase stark ähneln und erst später Eigenentwicklungen auftreten. Diese Ähnlichkeiten deutete *Haeckel* als Hinweis darauf, dass am Beginn der Stammesgeschichte der Wirbeltiere ihr Uremryo bereits so ausgesehen hatte. In dieser speziellen Aussage hat *Haeckel* etwas zu vereinfachend gedacht. Der Grundgedanke ist selbstverständlich richtig, dass nämlich auch Merkmale in den Embryonalstadien einer Selektion unterliegen. Heute ist aus diesen Befunden sogar eine eigene Forschungsrichtung innerhalb der Entwicklungsbiologie entstanden, nämlich die evolutionäre Entwicklungsbiologie (abgekürzt *EvoDevo*). Das heutige Verständnis der biogenetischen Grundregel baut auf der Erkenntnis auf, dass ein Organismus ein sich kontinuierlich anpassendes, stets im Umbau befindliches System darstellt.



Hühnerembryo (*Gallus domesticus*)