

1. Biodiversität und Evolutionstheorie		
1.1 Biodiversität	Du kannst die drei Ebenen der Biodiversität beschreiben und die Ursachen erklären.	
1.2 Die Synthetische Evolutionstheorie	Du kannst allgemeine Merkmale von Evolution, den prinzipiellen Ablauf nach der Synthetischen Evolutionstheorie und aktuelle Beispiele zur Evolution beschreiben.	
1.3 Die Evolutionsfaktoren Rekombination, Mutation und Selektion	Du weißt, dass eine geschlechtliche Fortpflanzung eine Rekombination des Erbguts bedeutet und kannst erklären, dass Rekombination die genetische Variabilität erhöht. Du kennst unterschiedliche Mutationsformen und kannst erklären, wie und weshalb Mutationen die genetische Variabilität erhöhen. Du kannst den Vorgang der Selektion anhand der drei unterschiedlichen Selektionstypen erläutern. Du kannst Evolution allgemein als Zusammenwirken dieser drei Faktoren erklären.	
1.4 Ein historischer Vergleich: Darwin und Lamarck	Du kannst Darwins Evolutionstheorie mit den passenden Begriffen beschreiben. Du kannst erklären, wie die Begriffe struggle for life und survival of the fittest leicht falsch verstanden werden können. Du kannst Lamarcks Evolutionstheorie beschreiben und erklären, weshalb sie falsch ist. Du kannst beide Theorien auf Evolutionsbeispiele anwenden.	
1.5 Auswerten, ob Evolution stattfindet	Du kennst die Voraussetzungen zu dieser Vorgehensweise (ideale Population, monogener Erbgang). Du kannst die Hardy-Weinberg-Regel anwenden und aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf ein Selektionsgeschehen ziehen.	
1.6 Gendrift – ein besonderer Evolutionsfaktor	Du kannst Gendrift als weiteren Evolutionsfaktor erklären und dazu ein Beispiel des Flaschenhalseffekts und des Gründereffekts beschreiben.	
1.7 Epigenetik und Evolution	Du weißt, dass Methylierungsmuster die DNA-Aktivität beeinflussen, dass sich diese Muster im Laufe des Lebens ändern können und diese Änderung auch weitervererbt werden kann.	
2. Belege für Verwandtschaft und Stammesgeschichte		
2.1 Die Vielfalt nach Verwandtschaftsgrad ordnen	Du weißt, weshalb man von einer natürlichen Systematik spricht. Du kannst ein Lebewesen Deiner Wahl taxonomisch eingliedern. Du kannst den Artbegriff definieren und kannst begründen, dass es evolutionsbedingt ein unscharfer Begriff ist.	
2.2 Der Prozess der Artbildung	Du kannst die drei Schritte der Artbildung beschreiben und zwischen allopatrischer und sympatrischer Artbildung unterscheiden. Du kannst den Prozess der Adaptiven Radiation erklären.	
2.3 Homologie und Analogie	Du kannst die Begriffe Homologie und Analogie definieren, die drei Homologiekriterien und je ein passendes Beispiel dazu nennen. Du kannst mit Abbildungen und Beschreibungen auf Homologie oder Analogie rückschließen und damit einen Rückschluss auf Verwandtschaft ziehen.	
2.4 Rudimentäre Organe und Atavismen	Du kannst die Begriffe Rudiment und Atavismus definieren und Beispiele nennen.	
2.5 Fossilien und Lebende Fossilien	Du kannst die Bedeutung von Fossilien zum Erstellen von Stammbäumen und Kladogrammen (siehe 2.7) beschreiben und die besondere Bedeutung von Mosaiktypen erklären. Du kannst den Begriff Lebendes Fossil definieren und beschreiben, weshalb solche Arten scheinbar nicht evolvieren.	
2.6 Kladogramme und Stammbäume	Du kannst den Begriff Kladogramm definieren und Merkmale beschreiben. Du kannst die Begriffe plesiomorph, symplesiomorph, apomorph und synapomorph erklären und zur Erstellung eines Kladogramms anwenden.	
2.7 Molekulare	Du kannst erklären, wie ein molekularer Stammbaum samt molekularer Uhr	

Belege für Verwandtschaft	entwickelt wird.	
3. Stationen der Evolution		
3.1 Zur Entstehung des Lebens	Du kannst die 4 Stationen zur Entstehung des Lebens beschreiben.	
3.2 Die Entstehung von Eukaryoten und Vielzellern	Du kannst die Entstehung von Eukaryoten erklären (Endosymbiontentheorie) und evolutive Vorteile von Vielzelligkeit und Differenzierung benennen.	
4. Evolution des Menschen		
4.1 Vergleich Mensch und Menschenaffe	Du kannst Merkmale rezenter Menschen und Menschenaffen vergleichend beschreiben. Du weißt, dass der Mensch nicht vom Affen abstammt, sondern dass diese Gruppen einen gemeinsamen Vorfahren haben.	
4.2 Zur Hominisation (Menschwerdung)	Du kannst entscheidende Stationen der Menschwerdung beschreiben (aufrechter Gang, Werkzeugherstellung, Feuernutzung, Rituale und Sprache, kulturelle und soziale Evolution). Du kennst die Entwicklung von Australopithecus, Homo habilis, Homo erectus, Neandertaler und Homo sapiens.	

(1) Biodiversität und Evolutionsbegriff

1.1 Biodiversität

Ebenen	Ursache
Innerartliche Vielfalt: Individuen einer Population mit unterschiedlichen Merkmalsausprägungen (Wechselbeziehung z.B. durch intraspezifische Konkurrenz)	Genetische Variabilität sowie unterschiedliche Umweltbedingungen
Artenvielfalt: viele Arten aus allen Reichen (Wechselbeziehungen z.B. interspezifische Konkurrenz, Nahrungsnetz, Begriff: ökologische Nische)	Unterschiedliche Umweltbedingungen
Vielfalt an Ökosystemen	

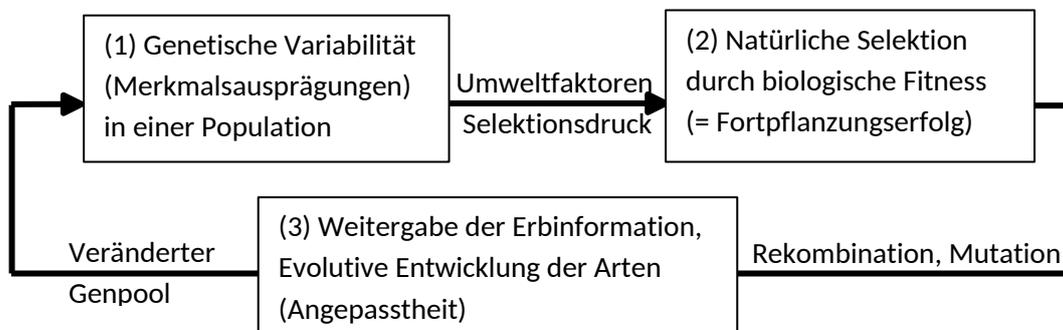
Die genetische Variabilität innerhalb der Arten ist die Grundlage von Evolution und Biodiversität.

1.2 Die Synthetische Evolutionstheorie

Merkmale:

- Evolution ist ein stetiger, nicht zielgerichteter Prozess
- Sie findet auf genetischer Ebene durch Mutation und Rekombination statt und führt durch Selektion zu einer Anpasstheit

Vorgang:



Beispiele aktuell sichtbarer Evolutionsprozesse:

1. **SARS/Cov-2-Virus:** durch **Mutation** aufgetretene neue Varianten haben eine höhere **biologische Fitness** (übertragen sich leichter von Mensch zu Mensch) und setzen sich durch **natürliche Selektion** gegenüber den vorhergehenden Varianten durch

2. **Mensch:** bestimmte **Mutationen** des Hämoglobingens etablieren sich durch **natürliche Selektion** in Gebieten mit Malaria, weil sie dort in der heterozygoten Form die Menschen vor der Krankheit schützt und diese so eine höhere **biologische Fitness** aufweisen (auch wenn die homozygote Form negative Auswirkungen darauf hat!)

--> Begriff: **evolutionärer Kompromiss**

1.3 Die Evolutionsfaktoren Rekombination, Mutation, Selektion

Rekombination:

Vorwissen: geschlechtliche Fortpflanzung, Meiose

- nach der Meiose (samt Crossing-over) bringt die Verschmelzung zweier Keimzellen bei der geschlechtlichen Fortpflanzung eine neue Kombination mütterlicher und väterlicher Chromosomen hervor, das Erbgut der Nachkommen ist verändert

- Rekombination (und Mutation) erhöhen die genetische Variabilität einer Population

Mutation:

Vorwissen: Genmutation, Chromosomenmutation, Crossing-over, Genommutation

- Mutationen in der Keimzelle (bzw. im frühen embryonalen Zustand) werden an die nachkommenden Generationen weitergegeben

- die Folgewirkung von Mutationen ist meist negativ oder neutral, in manchen Fällen führt sie aber zu einer höheren biologischen Fitness

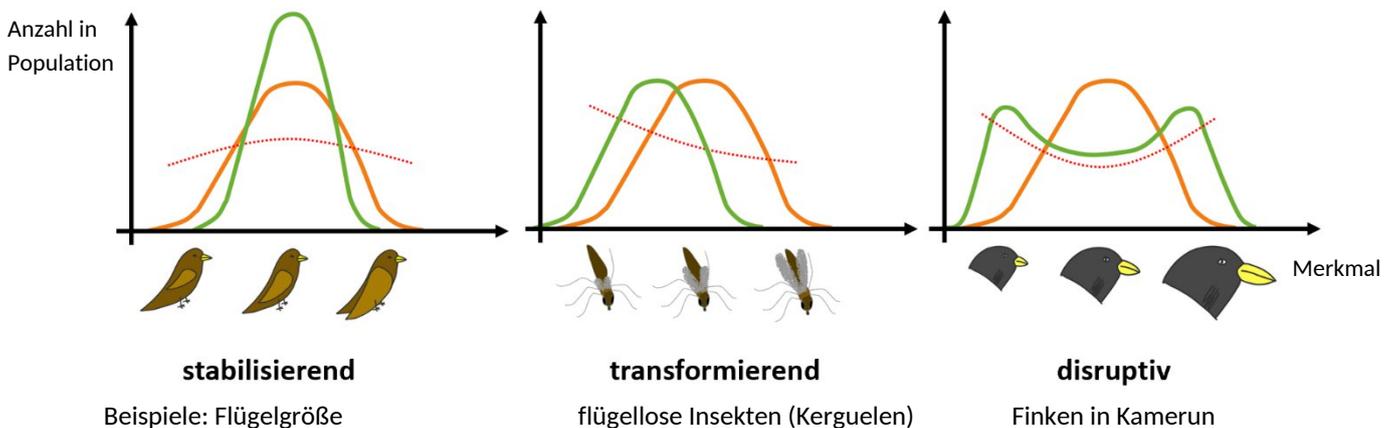
Natürliche Selektion:

Vorwissen: Umweltfaktoren (abiotisch, biotisch)

- Selektion: Umweltfaktoren --> unterschiedliche biologische Fitness --> unterschiedlicher Fortpflanzungserfolg

- die Selektion senkt oftmals die genetische Variabilität einer Population, weil sie für eine Anpasstheit sorgt

- wir unterscheiden drei Wirkungsweisen von Selektion:



--> rot-gestrichelte Linie: Fitnessfunktion / orangefarbenen Linie: ursprüngliche Verteilung eines Merkmals in einer Population / grüne Linie: Verteilung nach Selektion

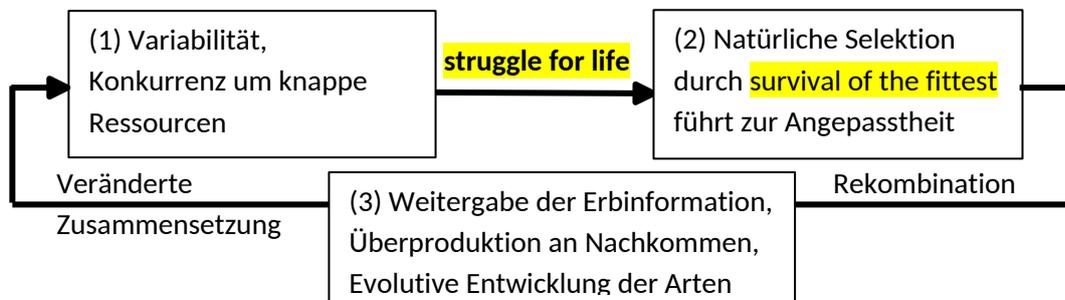
1.4 Ein historischer Vergleich: Darwin und Lamarck

Im 19. Jahrhundert erkannten mehrere Wissenschaftler, dass es Evolution gibt. Ihre Erklärungsansätze unterschieden sich dabei aber zum Teil grundlegend. Die bekanntesten Gegenpositionen lieferten sich Darwin (und Lamarck).

a.) Darwins Evolutionstheorie

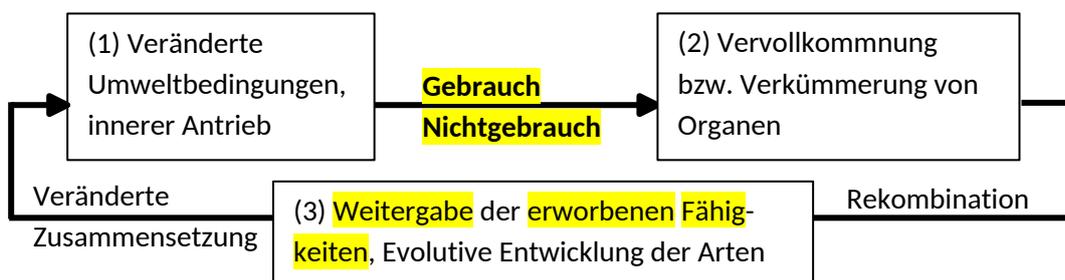
- Überproduktion an Nachkommen in einer Population
- erblich bedingte Variabilität
- Konkurrenz um knappe Ressourcen (struggle for life)
- survival of the fittest: die am besten Angepassten haben einen größeren Fortpflanzungserfolg und geben ihre Gene weiter
- Prozess über einen langen Zeitraum: Veränderung der Arten

Viele dieser Annahmen haben sich bis heute erhalten, kritisch war vor allem die Wahl der Begriffe *struggle for life* und *survival of the fittest*, die leicht falsch verstanden werden können. Das Schema seiner Argumentation: Es ist der Kampf um Ressourcen (**struggle for life**), die in einer genetisch variablen Population die am besten Angepassten herausselektiert, deren Gene werden häufiger weitergegeben, der Prozess ist also **passiv**, das Resultat eine Angepasstheit.



b.) Lamarcks Evolutionstheorie

Lamarck ging fälschlicherweise davon aus, dass Evolution seinen Ursprung in einer **aktiven** Anpassung der Lebewesen an veränderte Umweltbedingungen über den **Gebrauch** oder **Nichtgebrauch** von Organen hat und dass diese **erworbenen Fähigkeiten weitervererbt** werden:



Beispiel Giraffenhals:

- ursprünglich kurzer Giraffenhals
- veränderte Umweltbedingungen: Nahrungsknappheit, innerer Antrieb, an Blättern in Baumkrone zu kommen
- Aktives Strecken des Halses, dadurch wird Hals etwas länger
- diese erworbene Eigenschaft wird an die nächste Generation weitergegeben (Fehlannahme)
- dadurch evolutive Entwicklung über viele Generationen hinweg zu langen Giraffenhälsen

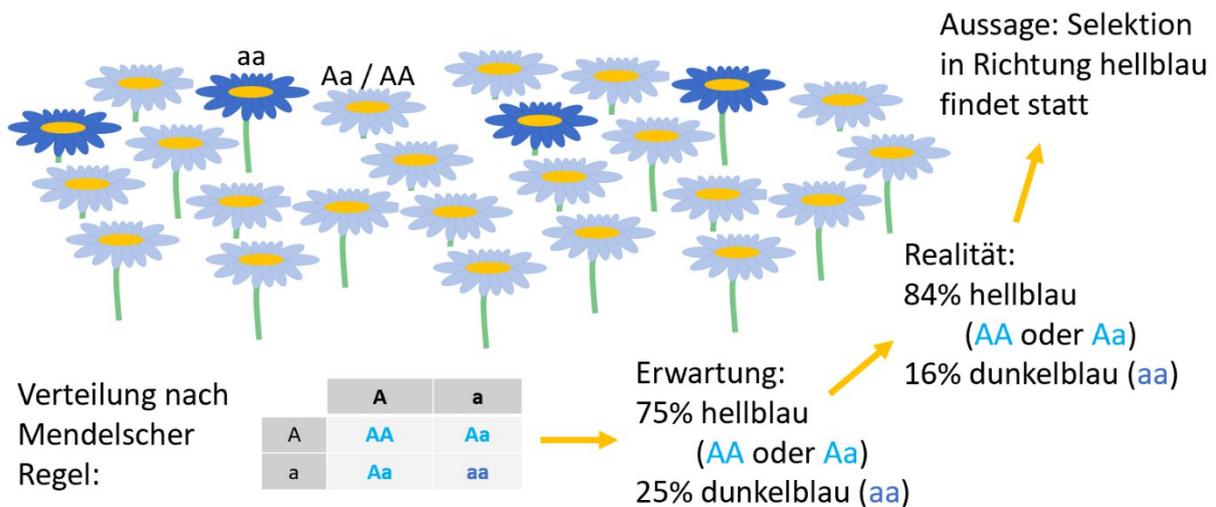
1.5 Auswerten, ob Evolution stattfindet

a.) Annahmen (Vereinfachungen) zum Hardy-Weinberg-Modell:

- es handelt sich um eine ideale Population mit einer großen Individuenzahl und ohne selektive Partnerwahl
- es handelt sich um ein monogen vererbtes Merkmal mit zwei möglichen Allelen

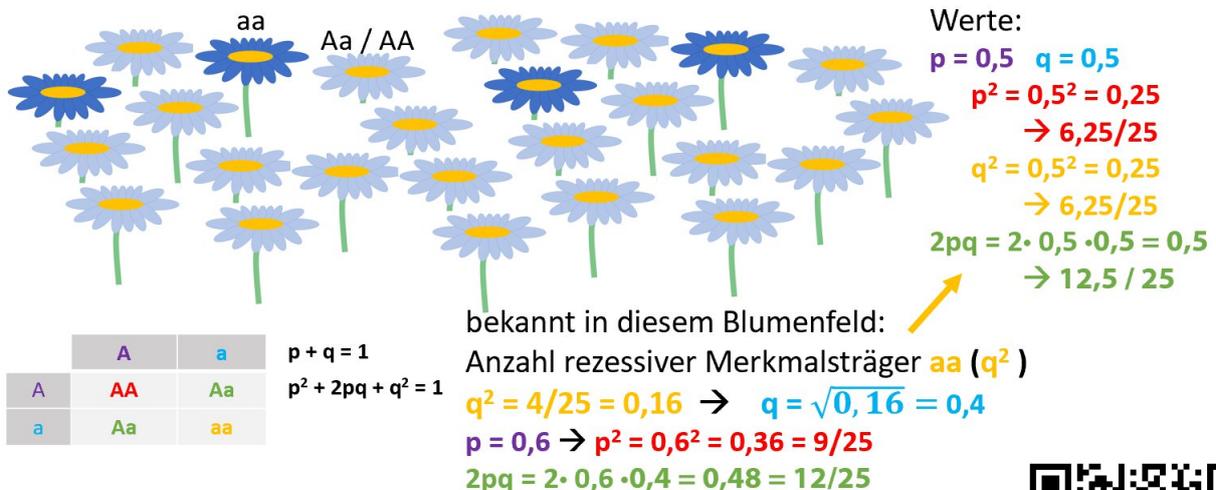
b.) Vereinfachte Aussage: weicht die Anzahl festgestellter Phänotypen oder Genotypen von der nach Mendel zu erwartenden ab, wird dieses Merkmal evolviert

- Population aus 25 Blumen einer Art, die sich im Merkmal der Blütenfarbe unterscheiden
- 4x dunkelblau (rezessiv, Allel a), 21x hellblau (dominant, Allel A)



c.) Dieselbe Aussage mit einer Quantifizierung nach Hardy-Weinberg:

- Population aus 25 Blumen einer Art, die sich im Merkmal der Blütenfarbe unterscheiden
- 4x dunkelblau (rezessiv, Allel a), 21x hellblau (dominant, Allel A)



1.6 Gendrift, ein besonderer Evolutionsfaktor

a.) Bisherige Annahmen:

Die natürliche Selektion führt dazu, dass die an Umweltfaktoren bestangepassten Individuen einer Population einen höheren Fortpflanzungserfolg haben. Dies lässt sich in einer Fitnessfunktion abbilden.

b.) Erweiterung um den Aspekt Gendrift:

Zufällige, deutliche Veränderung der Genpool-Zusammensetzung durch einen **Flaschenhalseffekt** (Beispiel: Naturkatastrophe) oder einen **Gründereffekt** (Beispiel: Neubesiedlung).



(siehe dazu auch 2.2 a.), Gendrift kann als Spezialfall der allopatrischen Artbildung betrachtet werden)

1.7 Epigenetik und Evolution

Außer dem Genom, also der Gesamtheit der DNA, existiert das **Epigenom** als regulierendes Element des Genoms. So können Methylierungen der DNA ein Ablesen eines DNA-Abschnitts verhindern. Das Besondere: Methylierungsmuster der DNA können sich im Laufe des Lebens (auch in den Keimzellen!) ändern und solche erworbenen Eigenschaften werden dann weitervererbt. So ist zum Beispiel erklärbar, weshalb die Neigung zu einer Allergie gehäuft in der nächsten Generation auftritt. Die **Epigenetik** untersucht solche Zusammenhänge.

(2) Belege für Verwandtschaft und Stammesgeschichte

2.1 Die Vielfalt nach Verwandtschaftsgrad ordnen

a.) Natürliche Systematik und Taxonomie:

Merksatz: *Siehe keine Ordnung für gering an.*

Eingliederung von Lebewesen in die **Systematik** (mit Beispiel):

Stamm (Chordatiere), **Klasse** (Lurche), **Familie** (Froschlurche), **Ordnung** (Echte Frösche), **Gattung** (Echte Frösche), **Art** (Grasfrosch)

Die Systematik heißt 'natürlich', weil sie sich an die tatsächlich vorhandenen Lebewesen anpasst und nicht diese in eine Kategorie hineinzwängt. Sie verändert sich also, wenn die Erkenntnisse sich ändern. Das Verfahren der Klassifizierung von Lebewesen heißt **Taxonomie** (Kategorien = Taxa).

Beispiele aus verschiedenen Stämmen:

Stamm: Chordatiere				
Klasse: Säugetiere Ordnung: Rüsseltiere Familie: Elefanten Gattung: Asiatische Elefanten Art: Asiatischer Elefant	Klasse: Vögel Ordnung: Sperlingsvögel Familie: Meisen Gattung: Meisen Art: Blaumeise	Klasse: Amphibien Ordnung: Schwanzlurche Familie: Echte Salamander Gattung: Eigentliche Salamander Art: Feuersalamander	Klasse: Reptilien Ordnung: Schuppenkriechtiere Familie: Echte Eidechsen Gattung: Halsbandeidech. Art: Zauneidechse	Klasse: Knochenfische Ordnung: Karpfenartige Familie: Karpfenfische Gattung: Karpfenfische Art: Karpfen

Stamm: Gliederfüßer		Stamm: Weichtiere		Stamm: Ringelwürmer
Klasse: Insekten Ordnung: Käfer ... Art: Marienkäfer	Klasse: Spinnentiere Ordnung: Webspinnen ... Art: Zitterspinne	Klasse: Krebse Ordnung: Asseln ... Art: Kellerassel	Klasse: Schnecken Ordnung: Lungenschnecken ... Art: Weinbergschnecke	Klasse: Regenwürmer ... Art: Regenwurm

b.) Der Artbegriff:

Die unterste Kategorie der Taxonomie ist die Art. Diesen Begriff benötigen wir in der Evolution, wenn wir den Prozess der Artbildung verstehen wollen.

Eine **Art** bildet eine Gruppe an Lebewesen, die ...

- sich untereinander fortpflanzen können und dabei fruchtbare Nachkommen bekommen.
- morphologisch und genetisch ähnlich sind.
- einen gemeinsamen Vorfahren haben.

Da es sich bei der Artbildung um einen fließenden Übergang von einer zu zwei Arten handelt, finden wir zu allen drei genannten Kriterien auch Beispiele, bei denen dieser so nicht (ganz) zutrifft.

2.2 Der Prozess der Artbildung

Wir unterscheiden die **allopatrische Artbildung** (*allos patria* = fremde Heimat), die mit einer geographischen Trennung einer Teilpopulation startet, von der **sympatrischen Artbildung** (sym = zusammen), bei dieser separiert sich eine Teilpopulation und bleibt dabei aber räumlich zusammen. Anschließend verlaufen die beiden Prozesse gleichartig:

1. Geographische Separation einer Teilpopulation führt zu getrennten Genpools (Isolation) (Auslöser z.B. Gründereffekt, geomorphologische Veränderung (Grabenbruch, Gebirgsbildung), Klimaveränderung (Gletscherbildung, Austrocknung eines Sees in mehrere kleine Seen)	1. Eine Separation ohne geographische Trennung einer Teilpopulation führt zu getrennten Genpools (Isolation) (Auslöser z.B. Änderung des Fortpflanzungsverhaltens bei einer Teilpopulation / Polyploidisierung bei einer Teilpopulation von Pflanzen)
2. Unabhängige Entwicklung der Teilpopulationen, Zunahme der genetischen Unterschiede durch Wirkung der Evolutionsfaktoren	
3. Neue ökologische Nische der Teilpopulation / Herausbildung einer neuen Art, wenn sich eine Fortpflanzungsbarriere entwickelt	

Besonderheit: Adaptive Radiation

Definition: zeitlich schnelle Auffächerung einer Stammart in viele neue Arten

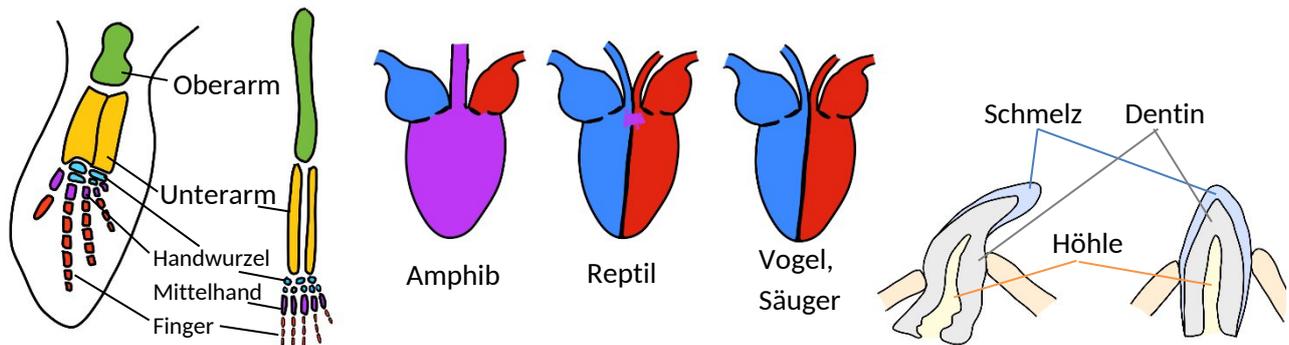
Beispiele und Vorgang:

- a.) **Darwinfinken:** 1. Gründerpopulation trifft auf Inselgruppe ohne Vögel, es existieren also zahlreiche ökologische Nischen / 2. Durch Zunahme der Anzahl an Finken entsteht ein Selektionsdruck / 3. Prozess der Einnischung läuft schnell ab, da ansonsten keine Konkurrenz besteht (hier: neue Schnabelformen und Körpergrößen --> neue Nahrungsquellen)
- b.) **Säugetiere:** 1. Katastrophe vor 65 Mio. Jahren führt zum Massenaussterben (z.B. Saurier), nur kleinere und geschützt lebende Tiere überleben (z.B. kleine Säugetiere), für diese existieren zahlreiche ökologische Nischen / 2. Zunahme der Population und Selektionsdruck / 3. schnell ablaufender Prozess der Einnischung

2.3 Homologie und Analogie

Definition Homologie: Bauplanähnlichkeit (auch: Ähnlichkeit physiologischer Prozesse oder Verhaltensweisen) aufgrund gleicher genetischer Abstammung. Homologe Merkmale gehen auf Merkmale eines gemeinsamen Vorfahren zurück und sind damit Belege evolutiver Vorgänge.

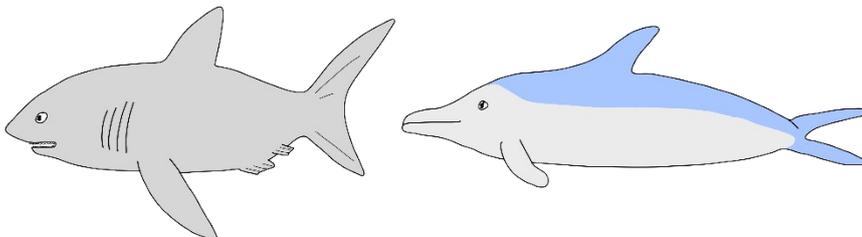
Homologiekriterien:



<p>1. Kriterium der Lage: Lage und Anordnung der Knochen ähneln sich bei den Wirbeltieren auch bei starken funktionellen Unterschieden</p>	<p>2. Kriterium der Kontinuität: Entwicklungsreihe, die auf eine kontinuierliche Entwicklung hindeutet. Beispiel: Amphibienherz (links) ohne Scheidewand, Reptilien (Mitte) mit unvollständiger und Säugetiere/Vögel (rechts) mit vollständiger Scheidewand</p>	<p>3. Kriterium der spezifischen Qualität: Haifisch-Schuppe und Säugetierzahn stimmen in besonderen Merkmalen überein, z.B. der Bausubstanz und der Anordnung</p>
---	--	--

Weitere Beispiele: Mundwerkzeuge der Insekten / Extremitäten der Insekten / primäres Kiefergelenk der Knochenfische und Gehörknöchelchen der Säugetiere / Schwimmblase von Knochenfischen und Lunge der Säugetiere / Balzverhalten von Enten und Hühnern

Definition Analogie: Ergebnis einer konvergenten Entwicklung, das heißt einer Anpassung an ähnliche Umweltfaktoren. Eine Analogie sagt also nichts über die Verwandtschaft aus.

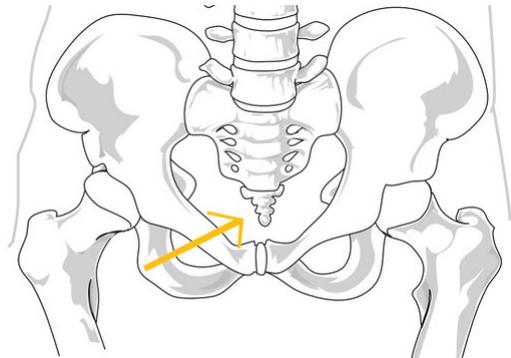


Beispiele: Stromlinienform von Fischen, Delfinen, Pinguinen / Grabextremitäten von Maulwurf und Maulwurfsgrippe / Linsenaugen von Kopffüßern und Säugetieren / Flügel von Vögeln und Fledertieren (Achtung: Knochenstruktur = Homologie) / Schnäbel von Enten und Schnabeltieren / Dornen von z.B. Kakteen und Stacheln z.B. von Rosen

2.4 Rudimentäre Organe und Atavismen

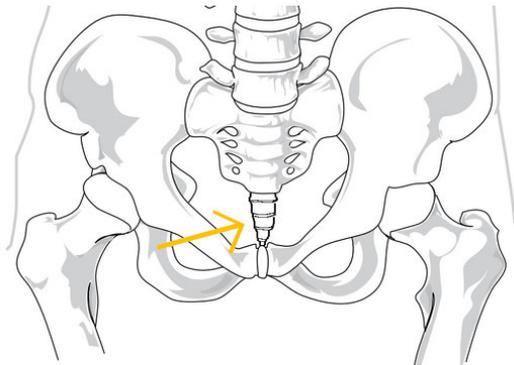
Definition Rudiment: zurückgebildetes, aber noch vorhandenes Merkmal (z.B. ein Organ oder auch ein Verhalten), das im Lebewesen keine oder nicht mehr die ursprüngliche Funktion erfüllt

Beispiele: Steißbein beim Menschen (siehe Bild) / Körperbehaarung, Blinddarm mit Wurmfortsatz, Weisheitszähne, Ohrmuskeln, Zirbeldrüse beim Menschen / Reste der Hüftknochen beim Wal / Reste von Extremitäten bei Schlangen / Augenrückbildung beim Grottenolm oder beim Maulwurf / Griffelbeine beim Pferd / Gehäusereste bei Nacktschnecken



Definition Atavismus: Eigentlich rudimentäre Organe können bei einzelnen Individuen wieder so auftreten, wie sie bei Vorfahren angelegt waren

Beispiele: herauswachsende Schwanzwirbelsäule durch ein verlängertes Steißbein beim Menschen (siehe Bild) / Halswirbel, zusätzliche Brustwarzen (Milchleiste), wollige Körperbehaarung / Griffelbein beim Pferd als zweite herauswachsende Hufe / kleine Hinterextremitäten bei Walen oder Schlangen



2.5 Fossilien und lebende Fossilien

Fossilien: Die Paläontologie hat bereits mehrere hunderttausend **fossile Arten** beschrieben und schätzt, dass die Anzahl an ausgestorbenen Arten mehr als eine Milliarde beträgt. Als Fossil erhalten blieb dabei nur ein kleiner Bruchteil, und zwar entweder als **Körperfossil** (mineralisiert = versteinert oder Abdruck) oder als **Spurenfossil** (z.B. Fußspuren, Verdauungsrückstände). Die allermeisten Fossilien finden sich in **Sedimentgesteinen**, eine bekannte Stelle in der Nähe ist die Grube Messel bei Darmstadt: In dieser **CO₂-Senke** kamen zahlreiche Tiere ums Leben, die aus dem schlammigen Kratersee trinken wollten.

Bedeutung von Fossilien für das Thema Evolution:

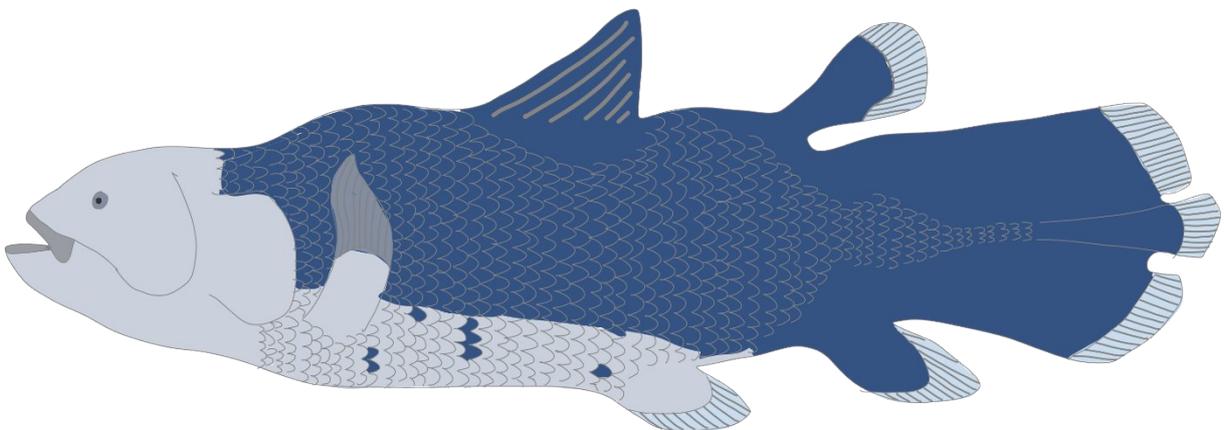
a.) **Mosaiktypen:** Fossile Arten, die Merkmale von zwei rezent lebenden Tieren aufweisen wie z.B. der Urvogel Archaeopteryx

Reptilienmerkmale	Vogelmerkmale
Zähne, drei Finger an Vorderextremität, Schwanzwirbelsäule	Federn, Schnabel, Gabelbein, opponierbare Zehe



b.) **Stammbäume**, ursprüngliche (plesiomorphe) und abgeleitete (aplesiomorphe) Merkmale: Fossilien bilden eine wesentliche Grundlage beim Erstellen von Kladogrammen und Stammbäumen (siehe 2.7)

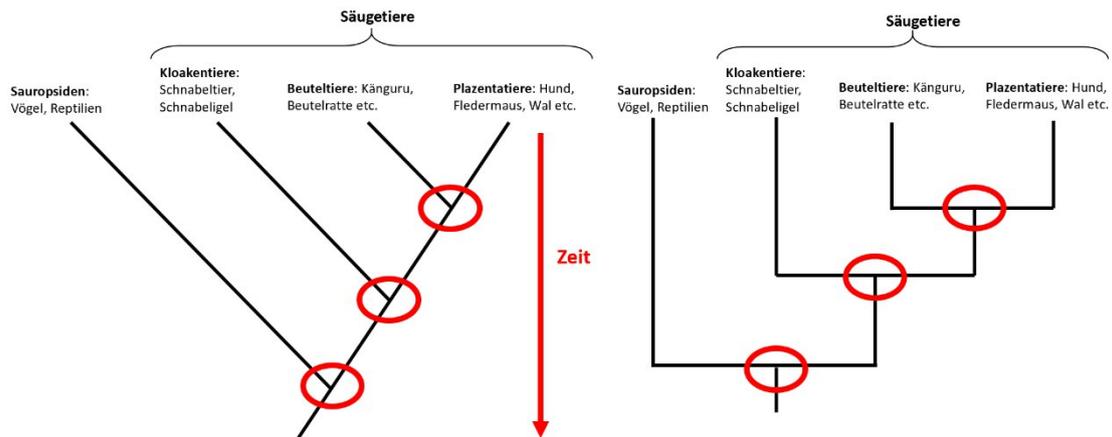
Lebende Fossilien: Eine rezente Art, die vom Bau und der Physiologie her einem fossilen Vorfahren sehr ähnlich ist wie z.B. der Quastenflosser Latimeria, der Kopffüßer Nautilus (Perlboot), Pfeilschwanzkrebse und bei den Pflanzen der Ginkgo oder Palmfarne. Ein von Darwin eingeführter Begriff, er wunderte sich, weshalb manche Arten scheinbar nicht der Selektion und Evolution unterworfen sind. Heute spricht man von einer „morphologischen Zwangsjacke“: die Lebewesen bewohnen meist Lebensräume, deren Umweltfaktoren sich über lange Zeit kaum verändert haben (z.B. Tiefsee).



Latimeria: rezenter Quastenflosser (bis 2m Länge und 100kg Gewicht, lebt in 200-400m Tiefe); Flossen wie Quasten eines Vorhangs, Bauch und Brustflossen mit Knochen, ähnelt den vor 400 bis 65 Mio. Jahren lebenden fossilen Quastenflossern noch stark

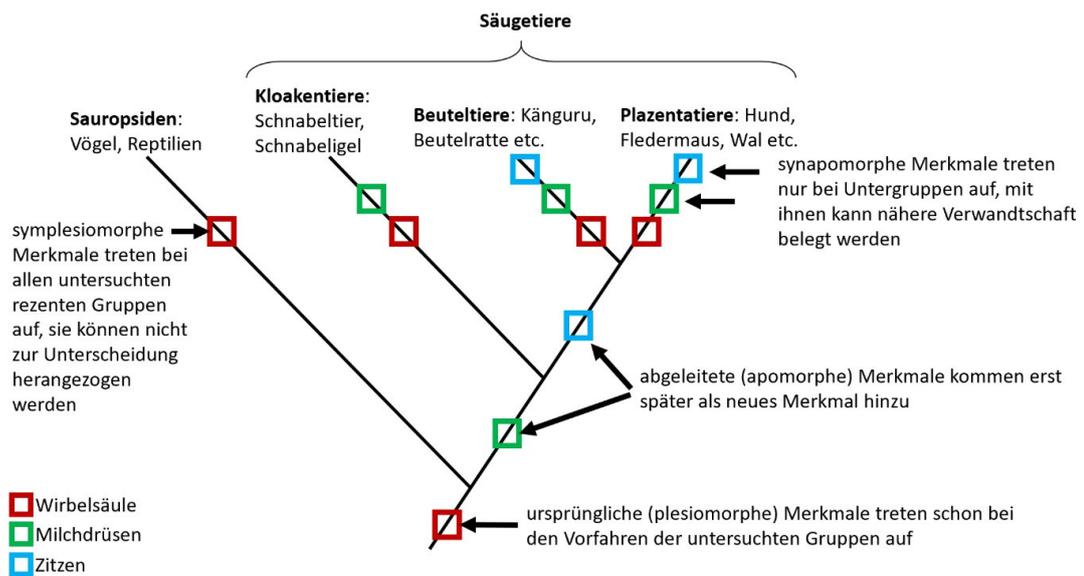
2.6 Kladogramme sind spezielle Stammbäume

a.) Definition und Merkmale eines Kladogramms:

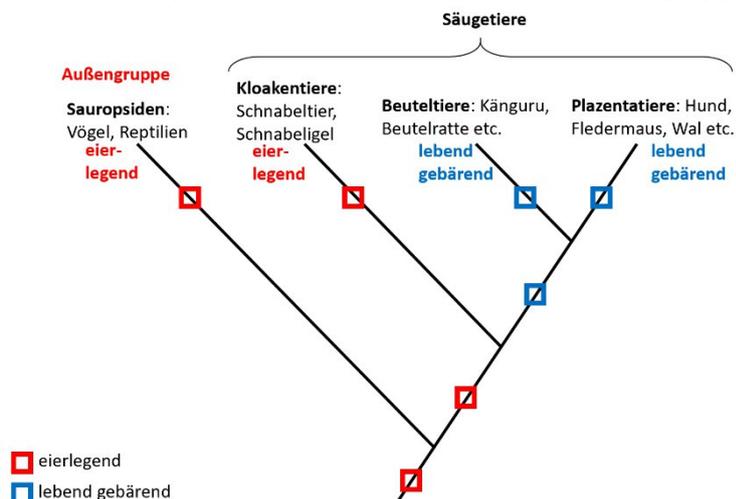


- Ein Kladogramm stellt die Verwandtschaftsverhältnisse von Gruppen dar und hat folgende Merkmale:
- es gibt verschiedene **Darstellungsmöglichkeiten** (auch gekippt möglich)
 - es sind nur **dichotome Verzweigungen** enthalten (zwei Äste)
 - weiter entfernte Gruppen **zweigen früher ab**, es gibt aber **keine absolute Zeitachse**

b.) Ursprüngliche und abgeleitete homologe Merkmale bilden die Grundlage zur Erstellung eines Kladogramms



c.) Plesiomorph oder apomorph bestimmt man durch einen Außengruppenvergleich



2.7 Molekulare Belege für Verwandtschaft

Hinter einem phänotypischen Merkmal steht immer eine genotypische Ausprägung und damit DNA und Proteine. Folglich sollte auch durch ein DNA- und Aminosäuresequenz-Vergleich Aussagen zur Verwandtschaft von Arten möglich sein. Dabei gilt: Je geringer der Sequenz-Unterschied, desto näher sind die betrachteten Arten miteinander verwandt.

Dies ist dann möglich, wenn zwei Annahmen erfüllt sind:

1. Es gibt eine **konstante Mutationsrate**
2. Die **Rekombination** spielt keine Rolle

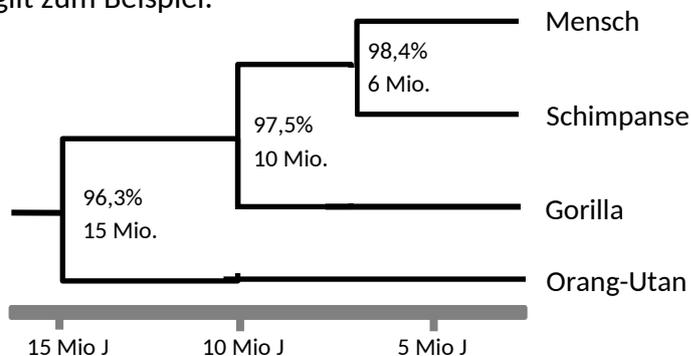
Zu 1. Die Mutationsrate hängt von vielen Faktoren ab (z.B. Häufigkeit von Mutagenen in der Umwelt wie UV-Strahlen / die Effizienz des DNA-Reparaturmechanismus). Um dennoch eine konstante Mutationsrate bestimmen zu können, haben Wissenschaftler zwei Aspekte berücksichtigt:

- a.) Sie konzentrieren sich auf einen **kleinen DNA-Bereich** wie z.B. einem Gen oder einem nicht codierenden Gen-Abschnitt und bestimmen mit einem großen Datenabgleich (Zeit, Populationsgröße) dessen Mutationsrate. Dadurch entwickeln Sie eine **molekulare Uhr** für diesen DNA-Abschnitt.
- b.) Sie nehmen **mitochondriale DNA (mt-DNA)**, weil diese nicht der Rekombination unterliegt (Mitochondrien werden nur über die Eizelle weitergegeben).

So werden schließlich **molekulare Stammbäume** entwickelt. Ein DNA-Vergleich zwischen Menschenaffen und Mensch könnte beispielsweise so aussehen:

Schimpanse	TTAGCTGATTGCCGGTAATGCTAGCATGCAATATTAAGACC
Mensch	TTAGCTGATTGCTGGTAATGCTAGCATGCAATATTAAGACC
Gorilla	TTAGCTGATTGCCGGTAATGCTAGCATGCAATATTACGACC
Orang-Utan	TTAGCTGATTGCCGGTAATGCTAGCATACAATATTACGACC

Kennt man die **Übereinstimmung** der DNA zwischen den Arten, kann man mit Hilfe der molekularen Uhr auch in etwa den **Zeitpunkt der Auftrennung** der Arten bestimmen. Für diese vier Arten gilt zum Beispiel:



Ähnliche Erfolge erzielte man durch den Vergleich von **Aminosäuresequenzen** von Proteinen. Mit Proteinen, die es schon sehr lange gibt und die die meisten Lebewesen besitzen (z.B. das **Cytochrom c** der Atmungskette), konnte man evolutive Zusammenhänge von Tierklassen herstellen und datieren.

3. Stationen der Evolution

3.1 Zur Entstehung des Lebens

- (1) Die **Erde** entsteht mit unserer Sonne und unserem Planetensystem vor etwa 4,5 Mrd. Jahren
- zunächst: 4700 °C Oberflächentemperatur, keine Atmosphäre, kein Wasser
 - bis 3,8 Mrd. Jahre: langsame Abkühlung, jahrtausende lange Niederschläge, Entstehung des Ur-Ozeans, Vorhandensein von: Methan, Ammoniak, Wasser, Stickstoff, Kohlenmonoxid
- (2) Vier Stufen von anorganischen Stoffen zu **Protozellen**
- einfache organische Moleküle**
Urey-Miller-Experiment: Nachbildung der Bedingungen der Erde vor 3,8 Mrd. Jahren - Nachweis der Synthese organischer Moleküle (z.B. Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren, organische Basen) aus anorganischen
 - Synthese von organischen Makromolekülen**
Kondensationsreaktionen führen zu größeren Molekülen wie Polypeptide, Mehrfachzucker, Nucleinsäuren, Selektion nach Stabilität der Moleküle
 - autokatalysierende Makromoleküle**
RNA-Welt-Hypothese: RNA-Moleküle können zwei maßgebliche Funktionen in sich vereinen:
 - katalytische Wirkung, um sich selbst zu vervielfältigen
 - Informationsspeicher durch Abfolge der NucleotideEntstehung von **Hyperzyklen:**
 - RNA katalysiert Bildung von Enzymen
 - Enzyme katalysieren weitere Stoffbildungen
 - Entstehung einer Protozelle**
 - Trennung von Innen und Außen durch Doppellipidschicht
 - im Inneren können die Reaktionen geschützter und effizienter ablaufen

3.2 Die Entstehung von Eukaryoten und Vielzellern

a. Eukaryoten entwickeln sich durch Endosymbiose mehrere Prokaryoten

In dem viele Millionen Jahre andauernden Prozess kam es zu verschiedenen Schritten:

- Es haben sich Prokaryoten ohne Zellwand entwickelt
- Die Zellmembran stülpt sich ein und bildet im Inneren der Zelle Reaktionsräume (Bsp.: Zellkern, Endoplasmatisches Reticulum)
- Die Zellmembran nimmt durch Endocytose Prokaryoten auf, verdaut sie aber nicht, sondern geht eine symbiotische Beziehung ein (Bsp.: Mitochondrien, Chloroplasten).

Belege für diese Endosymbiontentheorie sind: 1. äußere Zellmembran entspricht im Bau der eukaryotischen, die innere im Bau einer prokaryotischen Zelle / 2. 70S-Ribosomen wie Prokaryoten / 3. eigene, ringförmige DNA, deren Nucleotidsequenz der von Cyanobakterien bzw. Proteobakterien aufweisen

b. Die Entwicklung zu Vielzellern bringt eine Differenzierung von Zellen mit sich

Der Blick auf heute rezent vorkommende einfachste Vielzeller zeigt die Entwicklung:

- Zusammenschluss mehrerer gleicher Zellen (Kolonienbildung)
- Zusammenschluss mit Zelldifferenzierung (z.B.: Geschlechtszellen mit meiotischer Reduktionsteilung, Rekombination ermöglicht größere Variabilität und damit Anpassungsgeschwindigkeit / hierbei auch Entstehung des systematischen Todes der Elterngeneration)
- weitere Differenzierungen: Bildung von auf eine Funktion spezialisierten Zellen

4. Humanevolution

4.1 Anatomischer Vergleich Mensch und Menschenaffe

Bereich	Menschenaffen	Mensch
Schädel	<ul style="list-style-type: none"> - Gehirnschädel kleiner als Gesichtsschädel (Schnauze, Überaugenwülste, fliehende Stirn) - Hinterhauptsloch hinten - U-förmiger Kiefer - große Eckzähne, gegenüber Zahnlucke, Zahnformel wie Mensch 	<ul style="list-style-type: none"> - Gehirnschädel größer als Gesichtsschädel (steile Stirn, herausstehender Nasenknochen) - Hinterhauptsloch mittig (Schwerpunkt) - parabolförmiger Kiefer (Sprachvermögen) - kleine Eckzähne, keine Zahnlucke
Körper	<ul style="list-style-type: none"> - C-förmige Wirbelsäule - langgestrecktes Becken 	<ul style="list-style-type: none"> - doppelt S-förmige Wirbelsäule (Dämpfung) - schüsselförmiges Becken (Schutz und Stabilisierung innerer Organe) - breiteres Becken bei Frauen (Geburt -> Gehirnschädel)
Extremitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Greifhand, kurzer, opponierbarer Daumen - Greiffuß, kein Gewölbe 	<ul style="list-style-type: none"> - Greifhand, längerer, opponierbarer Daumen - zusammen mit Fingernägeln: Präzisionsgriff - Lauffuß mit Fußgewölbe

4.2 Hominisation (Menschwerdung)

Art	Daten	Fähigkeiten in Bezug zur Menschwerdung
Vormenschen Australopithecus	<ul style="list-style-type: none"> - vor 4-2 Mio. Jahre in Ost- und Südafrika - Gehirnvolumen ca. 350cm³ 	<ul style="list-style-type: none"> - permanenter aufrechter Gang
Frühmenschen Homo habilis	<ul style="list-style-type: none"> - vor 2,4-1,8 Mio. Jahren in Afrika - Gehirnvolumen ca. 700 cm³ 	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von Werkzeugen aus Stein und Knochen (Faustkeil, Messer, Schaber) - ab hier: erhöhter Proteinkonsum (Fleisch) ermöglicht Gehirnwachstum
Frühmenschen Homo erectus	<ul style="list-style-type: none"> - vor 1,8-Mio. bis 12t Jahren in weiten Teilen der Erde - Gehirnvolumen ca. 900 cm³ 	<ul style="list-style-type: none"> - Wanderung von Afrika über den Kaukasus bis nach Europa (Homo heidelbergensis), Ostasien (Pekingmensch) und Indonesien (Javamensch) - voranschreitende Werkzeugherstellung (z.B. Speere seit 300t Jahren, Äxte) - Feuernutzung seit ca. 800t Jahren: hält Raubtiere und Parasiten fern, erschließt neue und verbessert Nahrungsquellen
Neandertaler	<ul style="list-style-type: none"> - vor ca. 130t bis 40t Jahren - Nachfahre des H. heidelbergensis 	<ul style="list-style-type: none"> - Sprache (Beleg: Art des Zungenbeins, Größe des Gehirns, FOXP2-Gen) - Bestattungsrituale (mind. seit 60t Jahren, Rückschluss auf Transzendenz)
Moderner Mensch	<ul style="list-style-type: none"> - vor ca. 200t Jahren bis heute 	<ul style="list-style-type: none"> - Out-of-Africa-Hypothese: besiedelte ausgehend von Afrika die ganze Erde (ab ca.

	<ul style="list-style-type: none"> - Gehirnvolumen ca. 1450 cm³ - entwickelte sich aus afrikanischer Homo erectus-Population 	<p>100t Jahre / Belege: Fossilien-Daten, DNA-Variabilität zwischen afrikanischen Völkern größer als zwischen Europäern, Asiaten, Amerikanern)</p> <p>- differenzierte Sprache, kulturelle und soziale Evolution</p>
--	---	--

4.3 Zur kulturellen und sozialen Evolution von Homo sapiens

- älteste Skulpturen wie z.B. Löwenmensch (40t Jahre) und Venus (30t Jahre)
- Monumentalbauten seit 12t Jahren (Beleg: Göbekli Tepe)
- neolithische Revolution und Sesshaftwerden: Ackerbau, Pflanzenzucht, Tierhaltung ebenfalls seit ca 12t Jahren / erste städt. Siedlung vor 9t Jahren in Mesopotamien (Beleg: Uruk)
- Entwicklung der Schrift (Keilschrift in Uruk)
- Verhüttung / Metallgewinnung (Beleg: ältestes Kupferbergwerk vor 7500 Jahren)