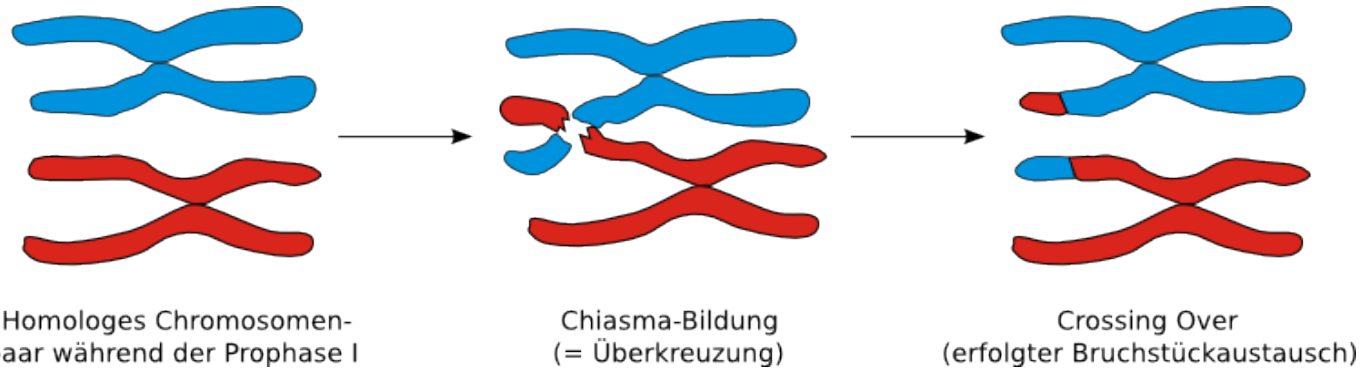
Kapitel 08.02: Zellzyklus, Mitose, Meiose und Apoptose als genetische Grundlagen



Freies Lehrbuch der Biologie von H. Hoffmeister und C. Ziegler
(unter GNU Free Documentation License, Version 1.2 (GPL)).

Die jeweils aktuellste Fassung finden Sie unter: https://hoffmeister.it/index.php/biologiebuch

Inhalt

Kapitel 08.02: Zellzyklus, Mitose, Meiose und Apoptose als genetische Grundlagen....1
Inhalt....2
Überblick über dieses Kapitel....4
Zusätzlich habe ich das Kapitel in vier Abschnitte unterteilt:....4
1. Ungeschlechtliche Vermehrung durch den Zellzyklus und die Mitose....4
2. Befruchtung und Bildung eines neuen Lebewesens....4
3. Meiose und Reifeteilung....4
4. Apoptose und Nekrose....4
Ungeschlechtliche Vermehrung durch Zellteilung....5
Mikroskopische Untersuchung der Zellteilungsphasen:....5
Was ist Wachstum? Warum wird eine Pflanze oder ein Mensch größer?....5
Aufgaben der Zellteilung (Cytogenese) und der Kernteilung (Mitose)....5
Ablauf und Bedeutung der Mitose (Kernteilung)....6
Aufgabe der Mitose....6
Die Mitose ist Bestandteil des Zellzyklus....7
Dauer der Phasen:....7
Der Zellzyklus und die Mitose....8
Wozu dient der Zellzyklus?....8
Wie läuft der Zellzyklus ab?....8
Die Mitosephasen in den wachsenden Wurzelspitzen einer Zwiebel....10
Die Mitose kann in 5 Phasen unterteilt werden....11
Eselsbrücke: zum Unterscheiden der Begriffe Centromer und Zentriol....12
Dauer der Mitose bei verschiedenen Arten....12
Aufgaben zum Zellzyklus und zur Mitose....13
Die geschlechtliche Vermehrung durch Befruchtung....14
a) Eizelle/ Spermium:....14
b) Schema zur Befruchtung....15
c) Befruchtung im Detail:....16
Die Befruchtung bei Pflanzen....17
Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pollen verschiedener Pflanzen....18
Ablauf und Bedeutung der Meiose (=Reifeteilung)....19
Ablauf der Meiose....20
Besonderheiten bei der Bildung von Eizellen....21
Zusammenfassung des Ablaufs der Meiose....23
Unterschiede zwischen Mitose - Meiose....24
Funktion und Bedeutung der Meiose (1h)....25
Zusammenfassung: Aufgaben der Meiose:....25
Aufgaben zur Übung - I - Vervollständige die Tabelle zur Keimzellbildung....26
Wiederholungsfragen zur Mitose und Meiose I....27
Meiosekarten....28
Wiederholungsfragen zur Mitose und Meiose II....29
Rassen & Arten....30
Kreuzworträtsel Genetik....30
Rassen & Arten (Lösungsblatt)....31
Kreuzworträtsel Genetik (Lösung):....31
Wiederholungsfragen zum Thema „Einführung in die Genetik und genetische Grundlagen“....32
Lösung: Freie Verteilung der Erbanlagen....33
Oberstufe: Bedeutung der Meiose....35
Rekombination....35
Oberstufe: Grafiken zum Crossing-Over....36
Crossing-Over....37
Double Crossing-Over:....37
Unterschiede der Meiose bei Mann und Frau....38
Statistisches zur Keimzellenproduktion....38
Unterscheidung Somazellen - Keimbahnzellen....38
Verteilung von Allelen in der Meiose (ohne Genkopplung)....39

Verteilung von Allelen in der Meiose (mit Genkopplung)....40
Apoptose & Nekrose....41
Der Sonnenbrand....41
Apoptose – wie sterben Zellen ab?....42
Ablauf der Apoptose im Gewebe....43
Beispiele für Apoptose:....44
Nekrose – wie sterben Zellen ab?....44
Erkrankungen mit erhöhter Apoptoserate:....45
Erkrankungen mit erniedrigter Apoptoserate:....45
Vergleich von Apoptose und Nekrose....45
Das Protein p53....45

Überblick über dieses Kapitel

Auch dieses Kapitel ist wieder für Mittelstufe und Oberstufe gedacht. Die Texte, die sich rein auf die Oberstufe beziehen, sind wieder in der Überschrift gekennzeichnet.

Zusätzlich habe ich das Kapitel in vier Abschnitte unterteilt:

1. Ungeschlechtliche Vermehrung durch den Zellzyklus und die Mitose.
2. Befruchtung und Bildung eines neuen Lebewesens.
3. Meiose und Reifeteilung.
4. Apoptose und Nekrose.

Ungeschlechtliche Vermehrung durch Zellteilung

Mikroskopische Untersuchung der Zellteilungsphasen:

Eine Küchenzwiebel wird auf ein mit Wasser gefülltes Becherglas gestellt. Es kommt zur Keimung, nach vier Tagen sind schon deutlich Wurzeln erkennbar. Diese sollen nun lichtmikroskopisch untersucht werden. Besonders in den Wurzelspitzen kann man Mitoststadien finden.

Damit die Mitosestadien sichtbar werden, müssen sie etwas kontrastiert werden. Dazu werden die Zellen 24 Stunden in Orcein oder Karminessigsäure gestellt und so gefärbt. Anschließend werden die Wurzelzellen abgekocht.

Die Zellen werden mit etwas Essigsäure (macht sie länger haltbar) auf einem Objektträger zerquetscht (nicht zerreiben!). Wenn mit einem Deckgläschen gequetscht wird, Vorsicht vor Splittern der Deckgläschen!

Was ist Wachstum? Warum wird eine Pflanze oder ein Mensch größer?

Eine Vergrößerung der Zellinhalte wie den Vakuolen und der Zunahme der Chloroplasten. Wird eine Zelle zu groß, muss auch eine Zellvermehrung stattfinden! Dazu muss notwendigerweise der Zellkern und das Erbgut reproduziert werden.

Zellen vermehren sich durch eine Zellteilung (=Cytogenese).
Dabei entstehen aus einer Zelle zwei mit dem Original absolut identische Zellen!
Ein wichtiger Abschnitt ist dabei die Kernteilung (=Mitose). Sie läuft bei allen Eukaryoten (=Lebewesen mit komplettem Zellkern) gleich ab.

Die Mitose (=Kernteilung) ist für die Teilung (also nicht sexuelle Vermehrung) von Zellen verantwortlich. Sie findet im Menschen und in Pflanzen immer statt: (wenn Pflanzen wachsen, Kinder wachsen, gebrochenen Knochen heilen, Blutkörperchen gebildet werden, usw...).
Bei der Zellteilung teilt sich zuerst der Zellkern, dann das Zellplasma. Die reine Kernteilung dauert dabei immer zwischen 60 und 120min. Die Dauer der gesamten Zellteilung variiert je nach Art.

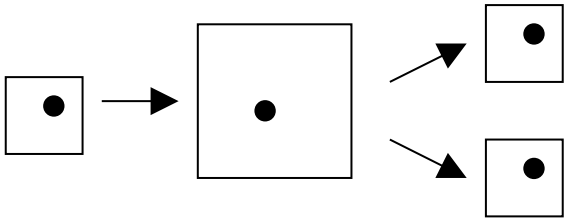
Aufgaben der Zellteilung (Cytogenese) und der Kernteilung (Mitose)

- Aufrechterhaltung der gesamten genetischen Information in jeder Zelle.
- Mitose => Wachstumsteilung mit dem Ziel identische Kopien zu bilden.
- Vorteil dieser Methode: Defekte bei der Mitose werden nicht an alle Zellen weitergegeben.

Ablauf und Bedeutung der Mitose (Kernteilung)

Die Zelle liegt die meiste Zeit in ihrer normalen „Arbeitsform“ vor. Dabei ist das Erbgut unspiralisiert und so kann es abgelesen und bearbeitet werden. Viele Zellen, aber nicht alle im Körper (z.B. Gehirnzellen), können auf bestimmte Signale hin sich teilen. Vor jeder Zellteilung erfolgt die Verdopplung (Reduplikation) der DNA.

Die Ursache für die Zellteilung ist ein Überschreiten einer bestimmten Kern-Plasma-Relation:

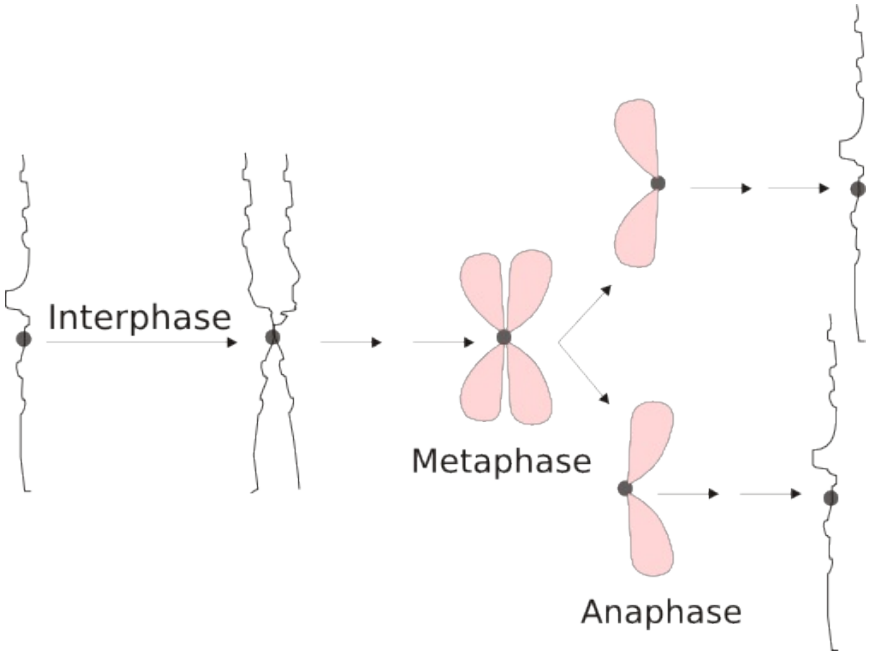


zwei neue Zellen entstehen!

Ursprungszelle (symbolisiert durch den Kasten) wächst.
Zellplasma nimmt zu.
Verhältnis (Relation) zum Zellkern (symbolisiert durch den schwarzen Punkt) wird größer
=> Zellteilung wird eingeleitet, die Organellen werden alle verteilt, was aber beim Zellkern nicht möglich ist, da es nur einen gibt!
=> Der Zellkern muss geteilt werden (Mitose)

Aufgabe der Mitose

- Aufrechterhaltung der gesamten genetischen Information in jeder Zelle.
- Die Mitose ist also eine Wachstumsteilung.
  1 Mutterzelle (2n)→ 2 Tochterzellen (2n)
- Defekte bei der Mitose werden nicht an alle Zellen eines Organismus weitergegeben, sondern nur an die neu entstandenen Zellen. Unter Umständen kommen sie niemals zum Vorschein.



Bei der Zellteilung entstehen aus einer Mutterzelle zwei Tochterzellen mit identischem Erbgut.

Die Mitose ist Bestandteil des Zellzyklus

Die Zeit, in der eine Zelle sich nicht teilt, in der sie in der sogenannten „Arbeitsform“ vorliegt, wird als Interphase bezeichnet. „Inter“ bedeutet „zwischen“. Gemeint ist also die Zeit zwischen zwei Teilungen.

Interphase: Arbeitsform des Kerns (= Interphasekern), Erbgut (DNA) liegt unspiralisiert als Chromatin vor.

Während der Mitose: Transport- und **Teilungsform**: Chromosomen kompakt und sichtbar im Lichtmikroskop.

Interphase und Mitosephasen wechseln sich regelmäßig ab. Man spricht deshalb auch von einem Zellzyklus. Die Dauer eines Zyklus kann sehr unterschiedlich lang sein. Viele Zellen teilen sich so nur langsam. Schnell kann es in Muskelzellen beim Training gehen. Ebenso kann Gewebe bei Verletzungen schnell durch Zellteilungen erneuert werden, sodass die Wunden heilen.

Teilungsfähige Zellen unterliegen immer dem Zyklus aus einer Arbeitsform (Interphase), in der die Zelle wächst und ihre Funktion erfüllt und den Phasen, welche für eine Zellteilung notwendig sind.

Das wiederholte Ablaufen von Interphase und Mitosephasen wird auch als Zellzyklus bezeichnet.

Die Interphase wird in mehrere Abschnitte unterteilt: G1, S, G2.

Die Mitosephasen finden nur bei noch teilungsfähigen Zellen statt. Zellen, die ihre Teilungsaktivität eingestellt (z.B. Gehirnzellen) oder zeitweilig unterbrochen haben, befinden sich in der G_0-Phase (vor dem Restriktionspunkt). Die G_0-Phase kann sehr unterschiedlich lang sein.

Dauer der Phasen:

Bsp.: **Ratte** G_1(10h), S(9h), G_2(4h), Mitose(1-2h)

Der Zellzyklus und die Mitose

Wozu dient der Zellzyklus?

Im Körper herrscht immer großer Bedarf an neuen Zellen! Ständig entstehen neue Zellen und ersetzen verbrauchte oder defekte Zellen, denn Körper wachsen, Muskeln müssen sich regenerieren, Wunden heilen, Blutkörperchen gebildet werden usw.

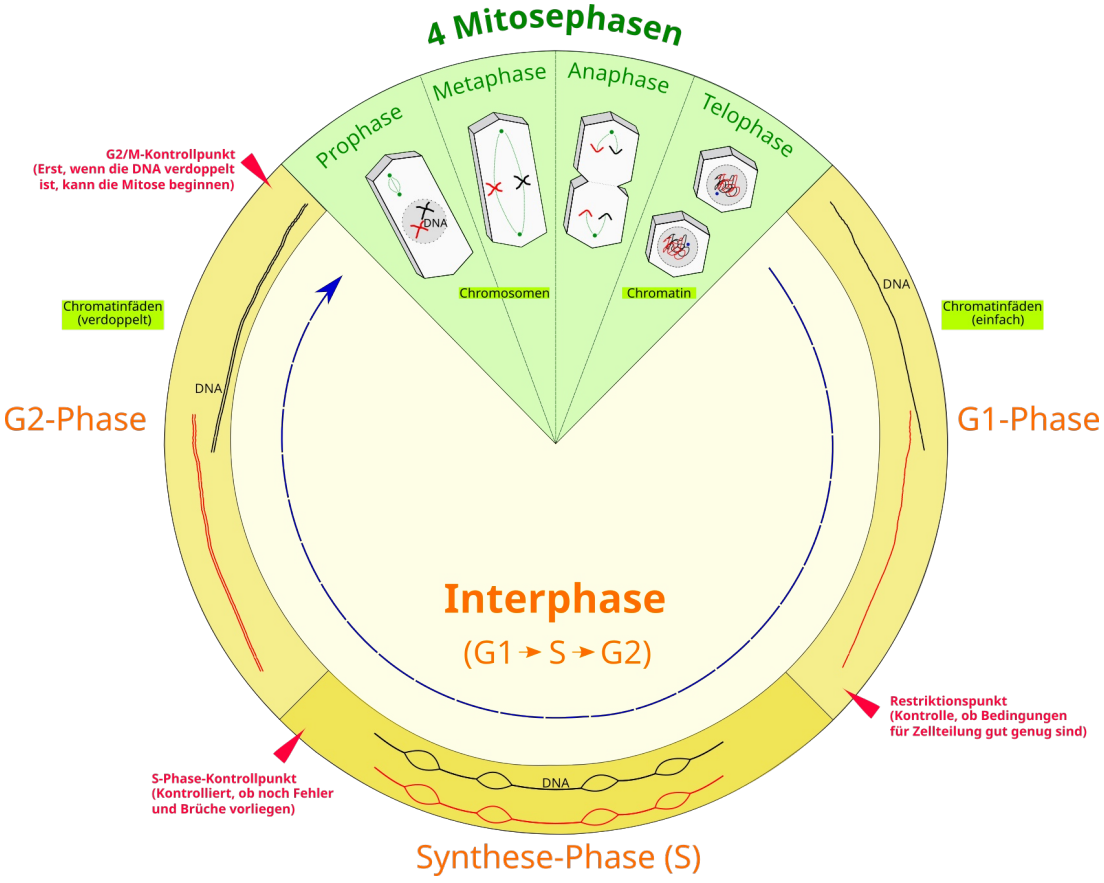
Diese Neubildung von Zellen kann man sich als Zyklus (=Zellzyklus) vorstellen, denn bei jeder Zellteilung werden die Erbinformationen an die entstehende Tochterzelle weitergegeben, dann muss diese zur alten Form und Größe heranwachsen und kann sich dann erneut teilen.

Wie läuft der Zellzyklus ab?

Zwischen den Teilungen muss die Zelle ihre eigentlichen Funktionen erfüllen können! Diese Zeit ist sehr wichtig und wird Interphase (inter = zwischen (zwei Teilungen)) bzw. Arbeitsform genannt. In diesem recht langen Zeitabschnitt wächst die Zelle und erfüllt ihre Aufgaben. Man kann diese Interphase in drei Abschnitte unterteilen: die G_1-, S- und G_2-Phase. Während aller drei Abschnitte wächst die Zelle, in dem sie Nährstoffe aufnimmt und Proteine sowie Zellorganellen produziert.

Den gesamten hier beschriebenen Vorgang findet man manchmal in Schulbüchern auch vereinfacht unter dem Begriff „Mitose“ zusammengefasst. Tatsächlich ist die Mitose aber nur ein (wenn auch sehr wichtiger) Zeitabschnitt im Zellzyklus.

Genauer ist also die Unterteilung in Mitose und Interphase. Die Mitose kann ebenfalls unterteilt werden in die eigentliche Mitose (=die Zellkernteilung) und die darauf folgenden Cytokinese (=Zellplasmateilung).



Die Zelle wächst nach einer Teilung (G1-Phase). Nachdem die Zelle eine Mindestgröße erreicht hat, werden zur Vorbereitung der eigentlichen Mitose in der S-Phase die Chromatiden zu Zwei-Chromatid-Chromosomen verdoppelt (S wie „Synthese der DNA“). Ist dies geschehen, wächst die Zelle weiter und schließt die Vorbereitung der Zellteilung ab (G2-Phase).

Am Ende der G2-Phase kommt es zur eigentlichen Mitose (M). Die Chromatiden verteilen sich auf die Tochterzellen und es folgt die Teilung des Cytoplasmas. Zwei kleine identische Zellen entstehen und der Zellzyklus beginnt von neuem, indem diese kleinen Zellen wieder wachsen (G1).

Beachte die Unterteilung der Interphase in drei Phasen:

G_1-Phase:	Unmittelbar nach Zellteilung durchlaufene Phase. Ablauf der Proteinbiosynthese => Vermehrung des Zellplasmas Bereitstellung von DNA-Bausteinen (=1. Wachstumsphase).
$S_{ynthese}$-Phase:	Verdopplung der Chromatiden zu Zwei-Chromatid-Chromosomen (Autoradiographie).
G_2-Phase:	Weitere, sich anschließende stoffwechselaktive Phase (=2. Wachstumsphase).
G_0-Phase:	Keine Synthesephase, nur Arbeitsphase, keine Vorbereitung auf Teilung.
M:	Mitosephasen

Das G steht für „Gap-Stadien“ (Gap = Englisch für Kluft, Lücke, Abstand, Schlucht Spalte)

Eine menschliche Körperzelle durchläuft den Zellzyklus je nach Gewebetyp ca. 10-100 mal. Dann wird sie meistens vom umliegenden Gewebe ersetzt, da zu alte Zellen ihre eigentliche Funktion nicht immer erfüllen können.

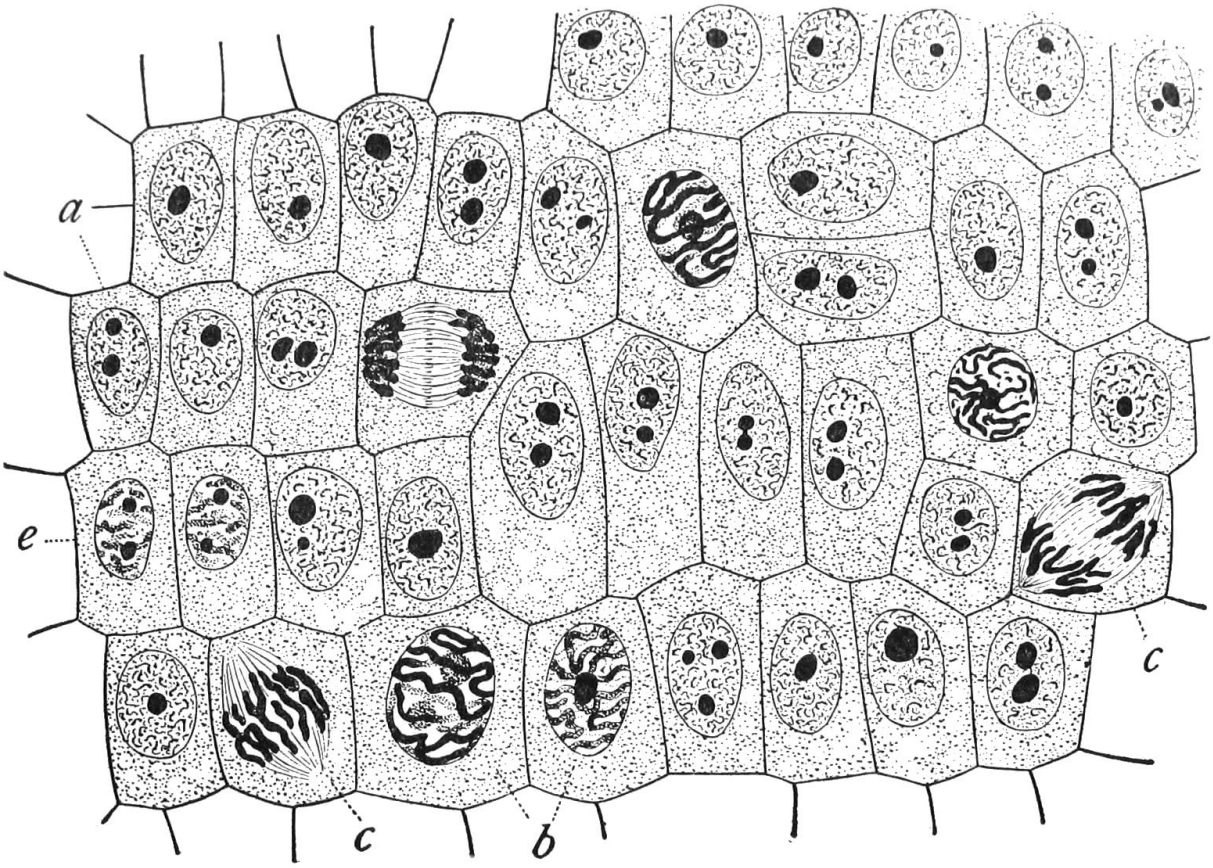
Oberstufe: Was passiert, wenn es nach einer DNA-Verdopplung zu keiner Zellteilung kommt?

Endomitose →
- **Polytänie**: Chromatiden bleiben zusammen (=> z.B. Riesenchromosomen)
- **Polyploidie**: Chromatiden werden getrennt, sind aber dann nicht auf 2 Zellen verteilt => Chromosomen liegen vervielfältigt in einer Zelle vor

Die Mitosephasen in den wachsenden Wurzelspitzen einer Zwiebel

„Übersicht über Zellen in der wachsenden Wurzelspitze der Zwiebel, von einem Längsschnitt, 800 Durchmesser vergrößert.

a. Nicht in Teilung befindliche Zellen, mit Chromatin-Netzwerk und stark gefärbten Nucleoli.
b. Kerne in der Vorbereitung auf die Teilung (Spirem-Stadium).
c. Sich teilende Zellen.
e. Ein Tochterzellpaar kurz nach der Teilung.



Quelle Bilkd: Public Domain by Wikicommonsuser Dietzel65 & Edmund Beecher Wilson The cell in Development and Inheritance (2nd ed.) 1900. Thank you: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wilson1900Fig2.jpg

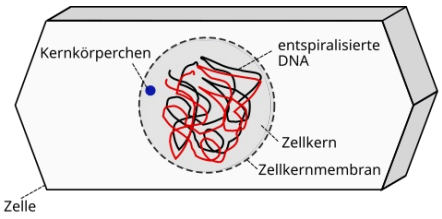
Die Mitose kann in 5 Phasen unterteilt werden

Beachte in der Skizze rechts: Für eine bessere Übersichtlichkeit, ist nur ein homologes Chromosomenpaar eingezeichnet, also je ein Chromosomen vom Vater und eines von der Mutter

Vor der eigentlichen Mitose findet die Interphase statt. Sie gehört nicht zur Mitose, sie findet zwischen zwei Mitosen statt!

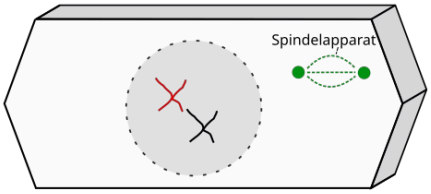
Interphase (=> Funktionsform, also die Phase zwischen zwei Mitosen!)

- Besteht aus G1, S und G2-Phase!
- Die DNA liegt als lange unsichtbare Fäden (Chromatin) vor, die jeweils nur durch das Centromer zusammengehalten werden.
- Erbinformation wird abgelesen („Arbeitskern“).
- Wachstum der Zelle.
- Verdopplung der Ein-Chromatid-DNA in Zwei-Chromatiden-DNA.
- Das Zentriol teilt sich, wandert zu den Zellpolen.



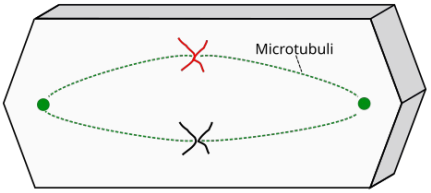
Prophase (erst jetzt spricht man von Chromosomen!)

- Beginnende Spiralisierung der DNA zu Chromosomen.
  => Chromosomen werden sichtbar & man kann sie im Lichtmikroskop unterscheiden.
- Die Kernmembran löst sich auf.
- Das Kernkörperchen (= Nucleolus) löst sich auf.
- Das Zentriol organisiert die Ausbildung des Spindelapparates.
- Erste Spindelfasern (= Mikrotubuli) bilden sich sternförmig, ausgehend von den Zentriolen. Die Spindelfasern binden an die „Kinetochoren“ der Zwei-Chromatiden-Chromosomen binden.
  Kinetochoren sind Proteinstrukturen, die den Zentromeren aufsitzen.



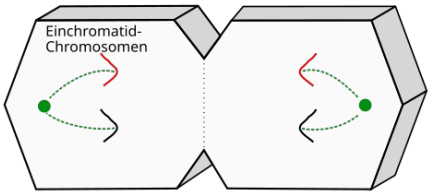
Metaphase

- Die Chromosomen kontrahieren weiter bis sie max. verkürzt sind.
- Die Zentriolen wandern zu den beiden Zellpolen und die Spindelfasern heften sich an die Kinetochoren der Chromosomen.
- Die Chromosomen ordnen sich in Äquatorialebene an.



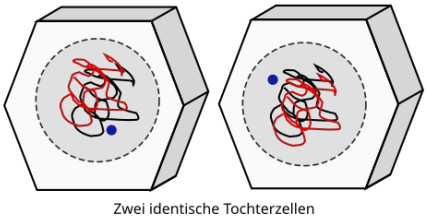
Anaphase

- Die Spindelfasern verkürzen sich und trennen so die beiden identischen Schwesterchromatiden am Centromer.
- Die identischen Chromatiden werden jeweils zu den Zellpolen gezogen
- Der Spindelapparat wird dann abgebaut.
- Jede Hälfte enthält nun einen vollständigen Satz an Chromatiden (beim Menschen 46!).



Telophase

- Die Ein-Chromatid-Chromosomen entspiralisieren sich => Arbeitsform.
- Die Zelle schnürt sich ein und teilt sich (bei Einzellern sogar komplett).
- Bildung einer neuen Zell- und Kernmembran (bei Pflanzen, Pilzen und Bakterien auch einer Zellwand).



(Im Anschluss: nächste Interphase)

Hinweise:

- Mitose findet man u.a. bei Wachstum, Wundverschluss, Bildung weißer Blutkörperchen, Krebs uvm.
- An die Telophase schließt sich wieder eine Interphase an!
- Dauer einer kompletten Zellteilung bei Eukaryoten 22h, bei Bakterien (Prokaryoten) nur 18 min.
- **Da Zellen sich immer wieder teilen, sind viele Zellen dadurch potentiell unsterblich.**

Eselsbrücke: zum Unterscheiden der Begriffe Centromer und Zentriol

Centromer befindet sich am **C**hromosom.
Zentriol im **Z**ellplasma.

Achtung: Das Zentriol ist Bestandteil des Zentrosoms und bildet den Spindelapparat aus, es ist nicht identisch mit dem Kernkörperchen (= Nucleolus).

Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Mitose
https://de.wikipedia.org/wiki/Eukaryoten
https://de.wikipedia.org/wiki/Prokaryoten
https://de.wikipedia.org/wiki/Nucleolus
https://de.wikipedia.org/wiki/Zentrosom
https://de.wikipedia.org/wiki/Zentriol

Dauer der Mitose bei verschiedenen Arten

Art	Interphase [min]	Mitose [min]
Fruchtfliege (Drosophila melanogaster)	3	6
Schleimpilz (Physarum polycephalum)	420	40
Seeigel (Psammechinus)		
- beim Embryo, erste Teilungen	14	28
- ab dem 200 Zellstadium	14	32
Hühnerfibroblasten (in Zellkultur)	700	23
Mausfibroblasten (in Zellkultur)	1300	40
Hamsterfibroblasten (in Zellkultur)	640	24
Säugetierzellkultur	900	60
Wurzelgewebe der Ackerbohne (Vicia faba)	1000	120
Ratte, Zellen der Hornhaut	14000	70

Aufgaben zum Zellzyklus und zur Mitose

1. Beschreibe den Ablauf des Zellzyklus und die Phasen der Mitose.
2. Nenne die Vorgänge nach Ablauf Abschluss der Telophase.
3. Wie lange dauert ein Zellzyklus?
4. Nenne die drei Aufgaben der Zellteilung.
5. Kann man die Lebensspanne eines Bakteriums vorhersagen? Wie lange lebt eigentlich ein Bakterium?
6. Entwickle eine Idee, wie man Rosen züchten kann, die größer(u.U. doppelt so groß) sind und somit größere Blüten haben? Tipp: Zuchtrosen haben einen 4-16 fachen Chromosomensatz!
7. Colchicin, das Gift der Herbstzeitlosen, hemmt während der Mitose die Ausbildung des Spindelapparates. Der Rest der Mitose läuft wie gewohnt ab. Nenne Folgen und welche genetischen Störungen Du erwartest. Begründe.
8. Nenne Situationen und Zeitpunkte, an denen Mitose stattfindet.
9. Ordne der Abbildung die jeweiligen Stadien des Zellzyklus zu und erläutere kurz in deinen eigenen Worten die wichtigsten Vorgänge der jeweiligen Phase.
10. Woher weiß die Zelle, wann sie sich teilen muss?
11. Werte die nachfolgende Graphik aus:

Zelltyp	Dauer Interphase [h]	Dauer DNA-Verdopplung [h]	Dauer gesamte Mitose [h]
Bildung roter Blutkörperchen im Knochenmark	2	8	0,7
Dünndarm	6	8	0,7
Dickdarm	22	8	0,7
Speiseröhre	170	8	0,7
Haut	989	8	0,7
Leber	9990	8	0,7

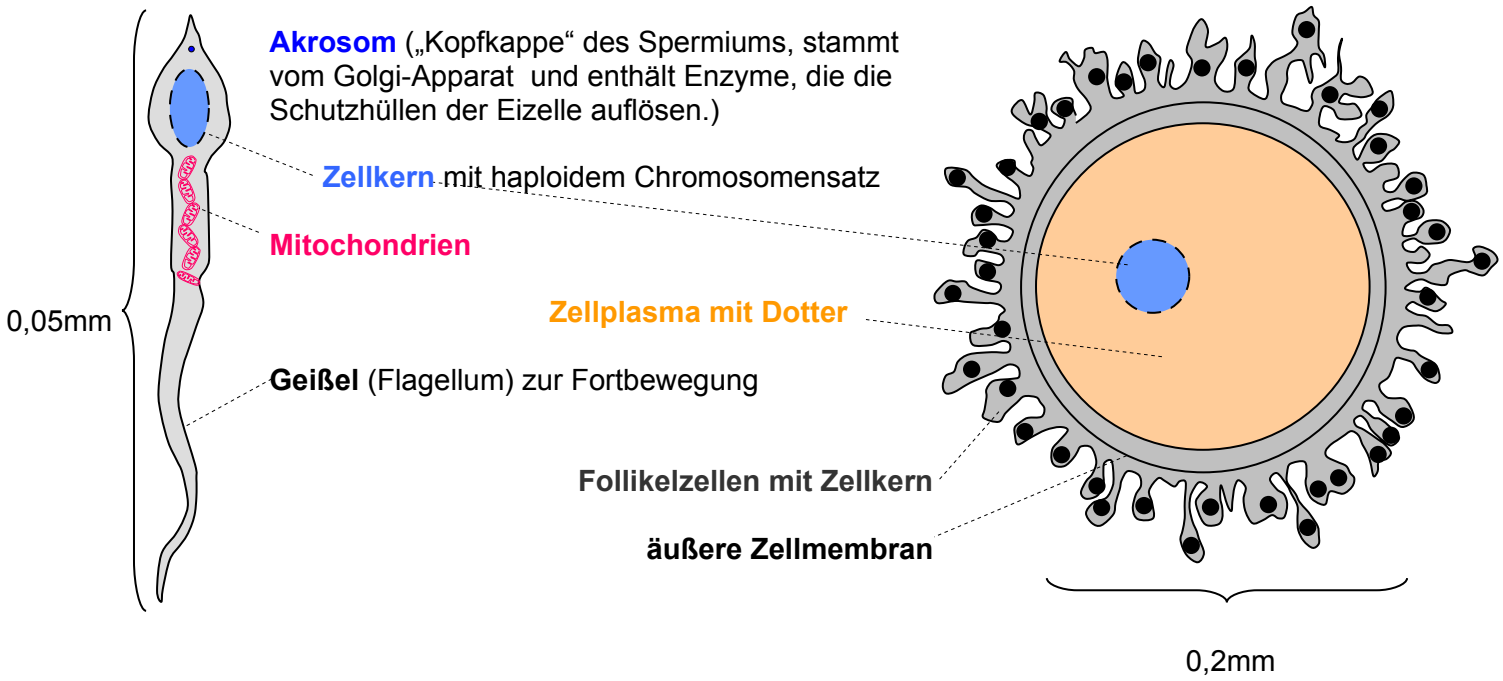
Die geschlechtliche Vermehrung durch Befruchtung

a) Eizelle/ Spermium:

Die Eizelle ist die weibliche Keimzelle und ist eine der größten Zellen des Körpers. Sie enthält Nährstoffe (auch Dotter genannt). Eine eigene, aktive Bewegung beherrscht sie nicht. Sie wird durch die Flimmerhärchen im Eileiter getragen.

Die männlichen Keimzellen, die Spermien, sind sehr klein und zur Fortbewegung in der Lage. Da sie aber kaum Nährstoffreserven enthalten, erreichen viele Spermien nicht die Eizelle.
Spermien sollten im Übrigen nicht als Samen bezeichnet werden. Aus Samen, welche diploid sind, wachsen neue Pflanzen. Im Pflanzenreich entsprechen vielmehr die Pollen den männlichen Keimzellen des Menschen.

Eizelle und Spermium sind haploid. Wenn sie bei der Befruchtung miteinander verschmelzen, bilden sie ein neues diploides Lebewesen mit völlig neu vermischtem Erbgut.



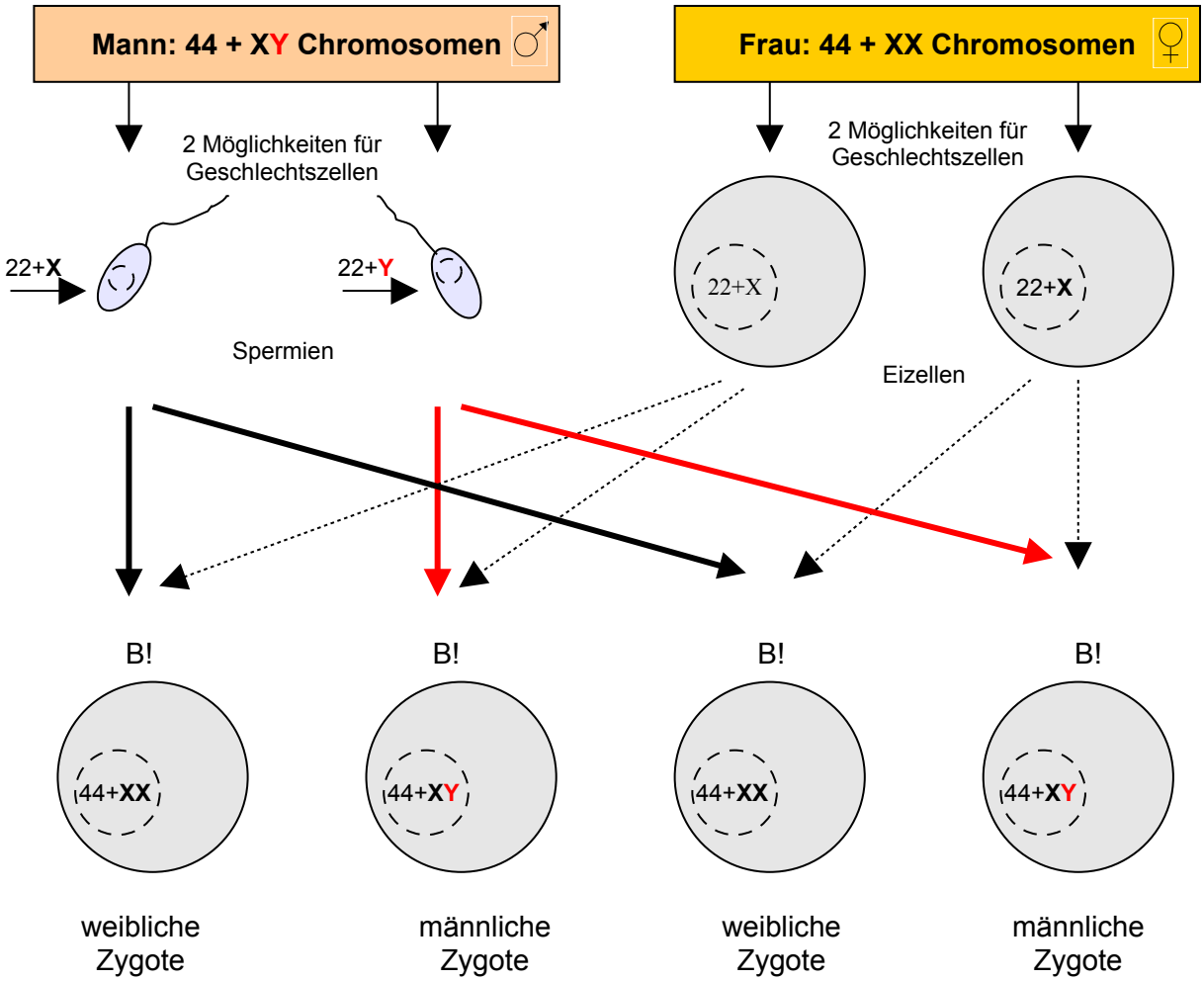
Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Spermien
https://de.wikipedia.org/wiki/Eizelle
https://de.wikipedia.org/wiki/Eierstock
https://de.wikipedia.org/wiki/Eileiter
https://de.wikipedia.org/wiki/Dotter

Bilder:
Eizelle im Moment der Befruchtung: https://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sperm-egg.jpg
Eizelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gray3.png
https://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Acrosome_reaction_diagram.svg

b) Schema zur Befruchtung

Mensch: **44 Körperchromosomen + 2 Geschlechtschromosomen =** 46 Chromosomen
(=diploider[1] Chromosomensatz)

EZ/ Spermium: **22 Körperchromosomen + 1 Geschlechtschromosom =** 23 Chromosomen
(=haploider Chromosomensatz in Spermien und Eizellen)



Die Erbanlagen für das weibliche bzw. männliche Geschlecht liegen beide auf den Körperchromosomen.

Die Entwicklung zu einem bestimmten Geschlecht wird jedoch von der steuernden Funktion der Geschlechtschromosomen bestimmt.

Befruchtung ist das Verschmelzen von zwei haploiden Gameten (hier Eizelle/ Spermium). Es entsteht eine diploide Zygote.

Die befruchtete Eizelle beginnt darauf, sich mitotisch zu teilen. Es entsteht ein Embryo.
Die Schwangerschaft des Menschen dauert in der Regel 280 Tage/ 40 Wochen

Befruchtung ist die Verschmelzung von zwei haploiden **Gameten** (=Eizelle/ Spermium).
Es entsteht eine diploide Zygote (=befruchtete Eizelle).

[1] diiploid = einfacher (!) Chromosomensatz, nicht wie oft fälschlicherweise gesagt wird doppelter!

c) Befruchtung im Detail:

Verschmelzen die Zellkerne zweier Keimzellen, zu einer Zygote, spricht man von Befruchtung. Die befruchtete Eizelle beginnt darauf, sich mitotisch zu teilen. Es entsteht ein Embryo.
Die Schwangerschaft des Menschen dauert in der Regel 280 Tage/ 40 Wochen

Befruchtung ist die Verschmelzung von zwei haploiden Gameten (=Eizelle/ Spermium).
Es entsteht eine diploide Zygote.

d) Erste Anzeichen einer Schwangerschaft:

1. Ausbleiben der Menstruation
2. Spannungsgefühle in der Brust (Durch das Hormon HCG, welches Milchproduktion vorbereitet)
3. 3 Wochen nach Ausbleiben der Regel kann der Arzt eine Schwangerschaft feststellen (Über Hormone im Urin).

Ein Schwangerschaftstest kann Klarheit über eine erfolgte Befruchtung bringen.
Frage dazu Deinen Arzt oder Apotheker.

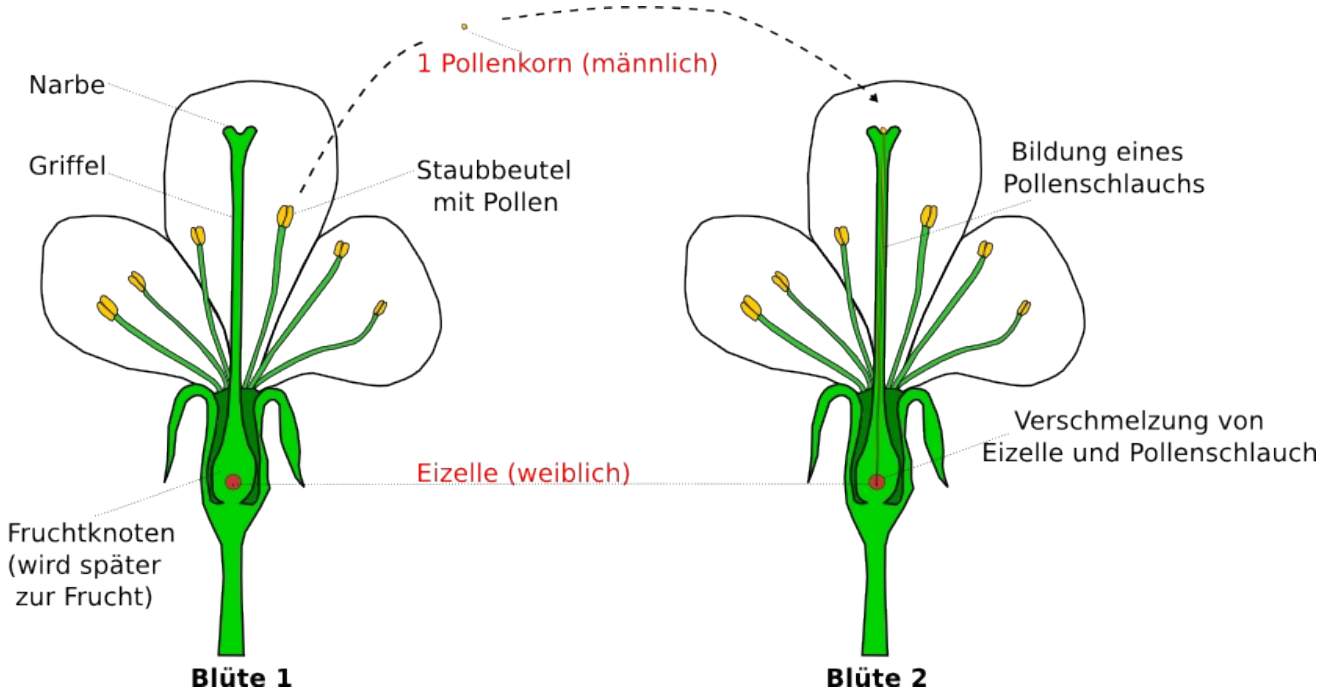
Aufgaben

1. Beschreibe den Aufbau von Spermium und Eizelle (Unterschiede?)
2. Was ist der wesentliche Unterschied zur Urkeimzelle?
3. Spermien bewegen sich über den Geißelschlag. Wie kommt aber die Eizelle vom Eierstock zur Gebärmutter?
4. Wie schützt sich der Körper vor mehrfacher Befruchtung?

Die Befruchtung bei Pflanzen

Auch Pflanzen müssen sich vermehren. Man spricht von Fortpflanzung. Dazu muss der Pollen, der auf den Staubblättern sitzt, zur Narbe einer anderen Blüte gelangen.

Merke: Bestäubung: Pollen (=Blütenstaub) trifft auf Narbe einer Blüte.



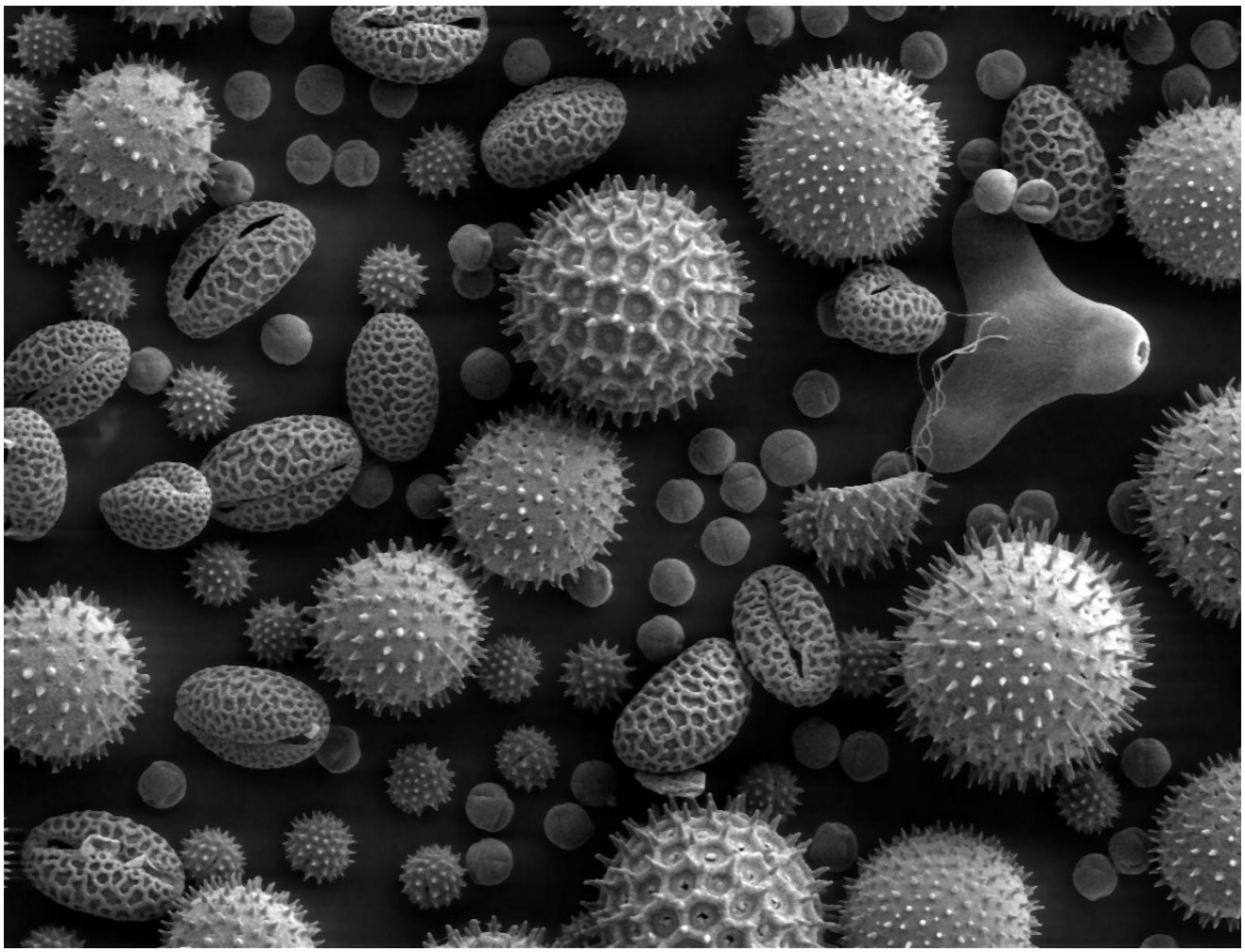
Der Pollen keimt auf der Narbe und bildet dabei einen Pollenschlauch. Dieser wächst durch die Narbe in das Innere des Griffels bis zu den Samenanlagen des Fruchtknotens, in denen die Befruchtung erfolgt.

Merke: Befruchtung: Befruchtung das Verschmelzen von zwei haploiden Gameten (hier Verschmelzen von Pollen und Eizelle). Es entsteht eine diploide Zygote.

Durch Befruchtung ist ein neues Lebewesen entstanden (Samen bzw. Frucht).
Es wird in den nächsten Wochen wachsen.

Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pollen verschiedener Pflanzen

Bei Pflanzen dienen zur Befruchtung die Pollen. Sie stellen das Gegenstück zu den Spermien im Tierreich da.



Quelle Bild: Public Domain by Dartmouth Electron Microscope Facility, Dartmouth College & Wikicommonsuser Gbiten - Thank you: https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Misc_pollen.jpg
(Source and public domain notice at https://remf.dartmouth.edu/imagesindex.html)

Ablauf und Bedeutung der Meiose (=Reifeteilung)

Wie gesagt, ist dieses Kapitel in drei Abschnitte unterteilt. Der nun folgende Abschnitt beschreibt einen Vorgang, der sehr komplex ist und einzig und allein dazu dient, Keimzellen (also Zellen zur Fortpflanzung: Spermien und Eizellen) herzustellen.

Aber wozu braucht die Natur da einen eigenen Vorgang? Wäre es nicht eigentlich einfacher, wenn sich die Menschen über eine Mitose fortpflanzen würden?
=> Nein, ganz sicher nicht! Zwei Gründe sprechen dagegen!

1. Für das Überleben einer Art ist eine genetische Variabilität wichtig und entscheidend. Würden sich Menschen ungeschlechtlich durch Mitose fortpflanzen, würden alle Menschen vermutlich fast gleich sein! Ein einzige starke Krankheit, wie ein Virus, würde dann vielleicht alle Menschen gleichzeitig krankmachen, da es ja keine genetische Vielfalt gäbe.

2. Die Zellen des menschlichen Körpers haben einen diploiden Chromosomensatz (2n). Es liegen also 46 Chromosomen vor. Alle Körperzellen gehen durch Mitosen aus der ursprünglich vorhandenen befruchteten Eizelle hervor.
Diese Zellen eignen sich natürlich nicht, um daraus direkt Spermien oder Eizellen zu bilden. Denn wenn diese auch etwa 46 Chromosomen hätten, dann würde die entstehende neue Zelle nach der Befruchtung, einen vierfachen Chromosomensatz (4n), also 96 Chromosomen haben. Die nächste Generation dann 192 usw. Das ist bei Menschen so nicht möglich!

Welcher Chromosomensatz muss also in Keimzellen (Eizelle und Spermien) vorliegen?

Keimzellen haben einen einfachen (=haploiden) Chromosomensatz (1n)

Die Mitose ist ein geeigneter Prozess um aus diploiden Körperzellen, wieder identische diploide Körperzellen herzustellen (=> erbgleiche Teilung).
Um den Chromosomensatz von 2n (diploid) auf 1n (haploid) zu reduzieren, ist hingegen die Meiose der passende Vorgang (Reduktion des Chromosomensatzes).
Man nennt die Meiose auch Reifeteilung, da ein Heranreifen der Keimzellen (Gameten) stattfindet.

Das Hauptproblem bei einer einfachen Addition des Erbguts: Der Nachwuchs hätte statt 46 dann 92 Chromosomen. Ein solches Lebewesen wäre nicht lebensfähig. Es muss also eine Reduktion stattfinden.
=> **Ziel 1: Aus einer diploiden Zelle, werden zwei haploide Zellen gebildet.**

Ein weiteres Problem: Wenn man die Anzahl der Chromosomen reduziert, verzichtet man auf die Chromosomen des Vaters oder die der Mutter? Weder noch! Es findet eine zufällige Auswahl statt.
=> **Ziel 2 : Zufällige Verteilung der elterliche Chromosomen (Durchmischung).**

Ziel 3: Keimzellenproduktion (beim Mann Massenproduktion!) als Voraussetzung für sexuelle Fortpflanzung.

Aus den genannten Gründen folgt also für die Meiose:

=> Das Erbgut von Vater und Mutter muss zufällig gemischt werden, bevor ein neues Lebewesen entsteht. Man nennt dieses Durchmischen auch Rekombination! Nur so kann eine Variabilität der Nachkommen gewährleistet werden.
Weiterhin muss das Erbgut um die Hälfte reduziert werden. Dabei dürfen aber keine überlebenswichtigen Eigenschaften und Merkmale wegfallen!

Ablauf der Meiose

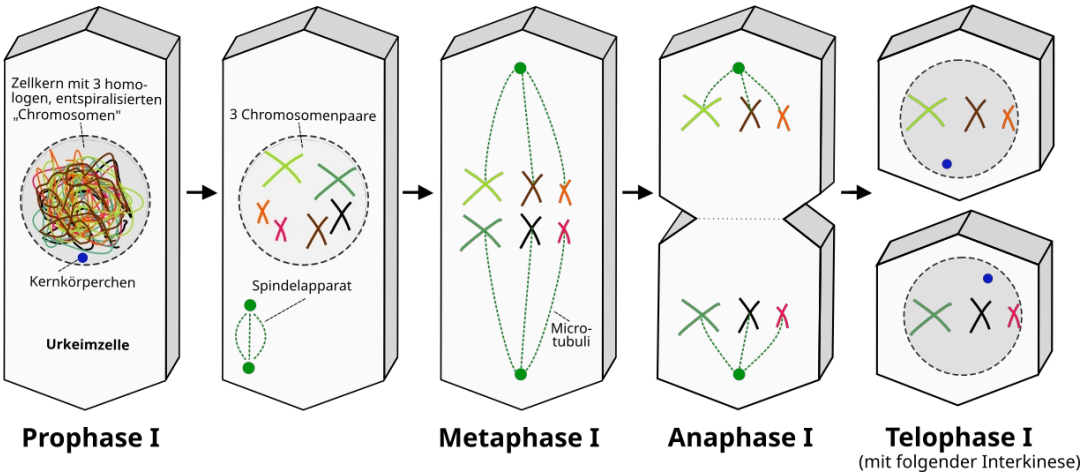
Bei der Bildung von Geschlechtszellen (Eizellen, Spermien) muss eine Verminderung der Chromosomenzahl erfolgen. Den dazu nötigen Prozess nennt man Meiose (= Reifeteilung).

Ziele:
- Produktion von haploiden Geschlechtszellen (= Keimzellen oder Gameten)
- zufällige Durchmischung der elterlichen Chromosomen

1. Abschnitt: Reduktionsteilung beim Mann

Zur besseren Übersichtlichkeit sind nur je drei Chromosomenpaare mit jeweils zwei Chromosomen von Vater & Mutter dargestellt.

1. Abschnitt: Reduktionsteilung beim Mann:



Prophase
Urkeimzelle mit 46 entspiralisierten, diploiden Chromosomen

Metaphase
Spiralisierung, Anordnung in der Mitte der Äquatorialebene, Kernmembran löst sich auf, Zentriole werden sichtbar

Anaphase
Zufällige Trennung v. väterl. u. mütterl. Chromosomen! (Zwei-Chromatid-Chromosomen werden getrennt!)

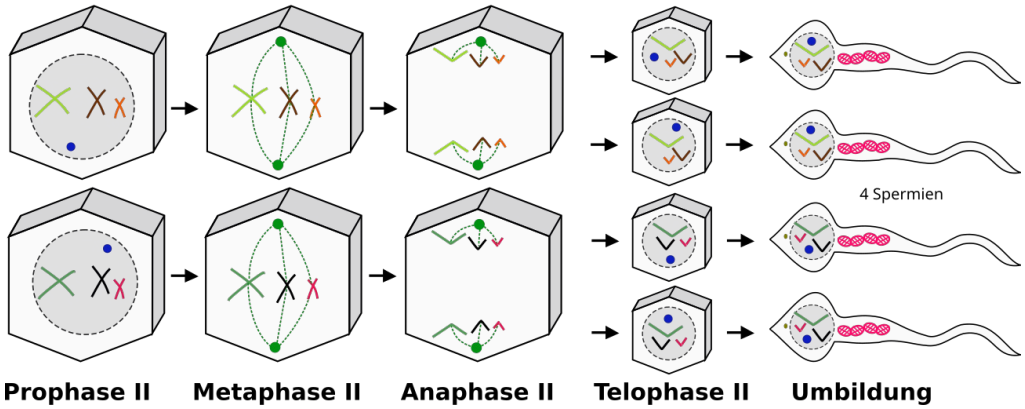
Telophase
Einschnürung der Zellen und anschließende Trennung. Es bilden sich zwei Zellen die jetzt verschiedenes Erbgut tragen, Entspiralisierung der Chromosomen.

2. Abschnitt: Äquatorialteilung beim Mann (entspricht im Grunde einer Mitose)

Ziel: Verdopplung der Geschlechtszellen (=Gameten)

2. Abschnitt: Äquatorialteilung beim Mann

(entspricht im Grunde einer Mitose)
Ziel: Verdopplung der Geschlechtszellen (=Gameten)

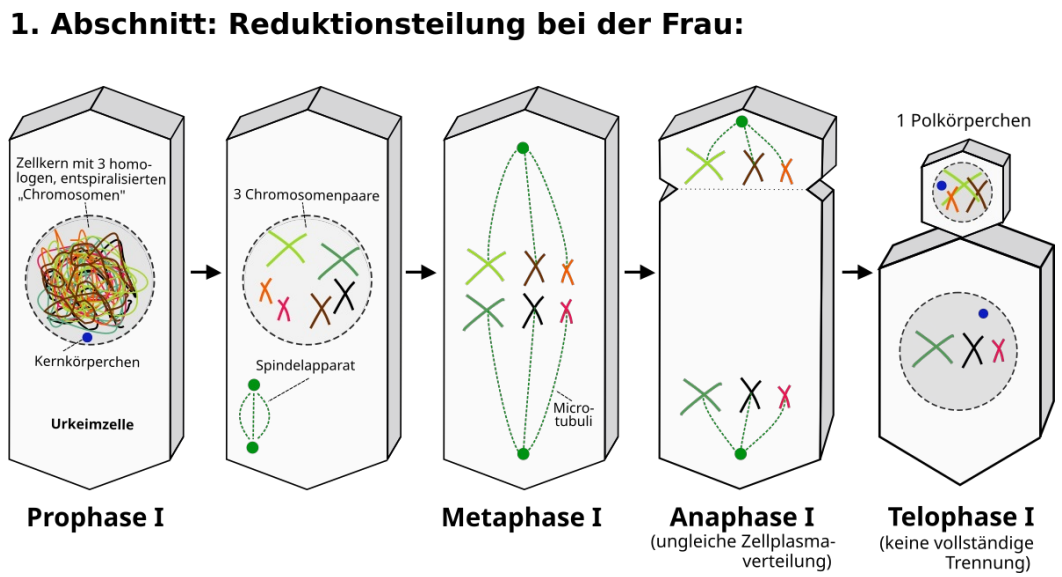


Von den 4 Spermien sind jeweils 2 identisch!

Besonderheiten bei der Bildung von Eizellen

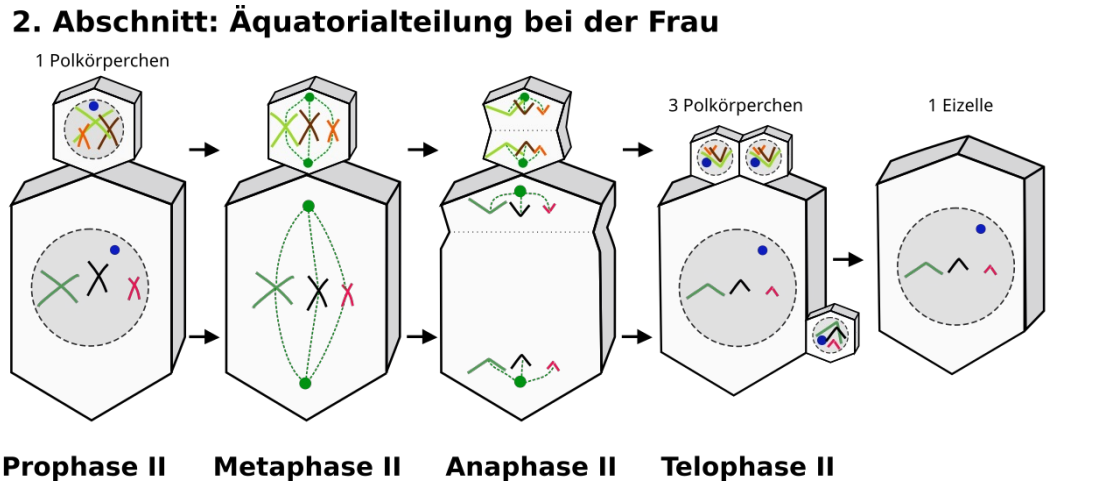
Während die Bildung von Spermien genau nach dem erklärten Muster verläuft, teilt sich die Eizelle bereits in der ersten Reifeteilung asymmetrisch in eine große, plasmahaltige Eizelle und eine deutlich kleinere (das sogenannte Polkörperchen). Bei der Bildung der Eizellen findet in der ersten Reifeteilung also eine ungleiche Verteilung des Cytoplasmas (des sogenannten Dotters) statt.
Beide Zellen enthalten natürlich einen haploiden Chromosomensatz. In der zweiten Reifeteilung teilen sich auch beide Zellen wieder, wobei die größere der beiden Zellen sich wieder asymmetrisch teilt. Im Endeffekt entstehen also eine große Eizelle und drei Polkörperchen, welche im Endeffekt absterben.

1. Abschnitt: Reduktionsteilung bei der Frau



2. Abschnitt: Äquatorialteilung bei der Frau (entspricht im Grunde einer Mitose)

Ziel: Verdopplung der Geschlechtszellen (=Gameten)



Tatsächlich sterben die drei Polkörperchen ab und nur die zellplasmareiche Eizelle überlebt. Das ist auch kein Problem, da eine Frau nicht so viele Eizellen benötigt.

Neben einer großen werden drei kleinere Zellen (die sogenannten Polkörperchen) gebildet. Die Ursache ist eine asymmetrische erste und zweite Reifeteilung.
Die große Zelle der vier Zellen wird zur Eizelle, die Polkörperchen gehen zugrunde.

Hinweise zur Eizellebbildung:

1. Bei Frauen werden sogenannte weibliche Ur-Keimzellen (bzw. Primärfollikel) nur kurz nach der Geburt gebildet (in den ersten 6 Wochen) und dann in den Eierstöcken gespeichert.
2. Bei Eizellen sterben die drei kleinsten (=Polkörperchen) ab, die größte hat einen Durchmesser von 0,2 mm und wird im Eierstock gespeichert.
3. Eizellen werden nur kurz nach der Geburt gebildet (in den ersten 6 Wochen) und in Eierstöcken gespeichert.
4. Während der Pubertät bekommen die Primärfollikel eine weitere mehrschichtige Hülle (Epithelgewebe). Der so entstandene Sekundärfollikel wandelt sich dann durch Umlagerungen von Epithelgewebe zu einem Tertiärfollikel um, (auch Graaf'scher Follikel genannt). Durch Reifung, wird ein Follikel einmal pro Menstruationszyklus durch Wachstum und v.a. Wassereinlagerungen bis zu 20mm (!) groß und gleichzeitig in die Lage versetzt auch Hormone (Anfangs v.a Östrogen, nach dem Eisprung dann Progesteron) zu produzieren.
5. Kurz vor dem Eisprung beginnt nun erst die erste Reifeteilung! Das Polkörperchen wird abgeschnürt und stirbt ab. Die zweite Reifeteilung beginnt erst nach (!) dem Eisprung. Sie wird durch Kontakt mit Spermien ausgelöst. Kommt es nicht zur Besamung, geht die Eizelle zugrunde.
6. Der Ausdruck „Eisprung" ist somit im Grunde falsch! Es müsste Follikelsprung heißen. Bei Menschen liegt er ungefähr 14 Tage nach Beginn der Monatsblutung.
7. Weiterhin findet man bei fast allen Säugetieren auch „provozierte Follikelsprünge". Diese spontane Follikelabgabe (=Ovulation) kann durch Stress, Fieber, Nervosität, hormonelle Schwankungen, Schlafmangel usw. ausgelöst werden.
8. Bei Hasen und Kaninchen kann der Begattungsakt selbst zur spontanen Ovulation reizen. Bei Katzen reicht ein mechanischer Reiz am Gebärmutterhals.

Generelle Hinweise:

1. Entwicklungsdauer der Spermien: 20 Tage, Anzahl 10 Mio./ Tag, Länge 0,04 mm
2. Bei Spermien wird eine Geißel gebildet.
3. In der Meiose wird nur ein Chromosom eines jeden Paares aus der ursprünglichen Zelle an die Tochterzellen weitergegeben. Die Geschlechtszellen enthalten also jeweils nur halb so viele Chromosomen wie die übrigen Körperzellen. Wenn sich väterliche und mütterliche Gameten bei der Befruchtung vereinigen, erhält die dabei entstehende Zelle wieder den vollständigen Chromosomensatz.
4. Die Meiose findet natürlich auch bei Pflanzen statt! So werden z.B. die Pollenkörner oder auch die Eizellen im Fruchtknoten entsprechend gebildet. Durch Verschmelzung der Eizelle mit dem Pollenschlauch wird sich ein Pflanzensamen bilden.
5. Für die zwei Abschnitte der Meiose existieren verschiedene Bezeichnungen:
   Erster Abschnitt = 1. meiotische Teilung = 1. Reifeteilung = Meiose I = Reduktionsteilung.
   Zweiter Abschnitt = 2. meiotische Teilung = 2. Reifeteilung = Meiose II = Äquationsteilung.
6. (Gelegentlich liest man auch die Bezeichnung „Reduktionsteilung" für die komplette Meiose!

Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Meiose

Zusammenfassung des Ablaufs der Meiose

Die Meiose besteht aus zwei Zyklen (erste und zweite Reifeteilung), von denen der Zweite der Mitose analog ist.

I. Reifeteilung (=Reduktionsteilung)

a) Prophase I

Vergleichbar der Prophase der Mitose:
- Chromosomen werden sichtbar
- Auflösung der Kernmembran
- Centriol teilt sich
- Paarung von homologen Chromosomen → Chromatid-Tetraden

b) Metaphase I

Vergleichbar der Metaphase der Mitose:
- Tetraden (also die zwei Chromosomen mit je 2 Chromatiden) ordnen sich zufallsbedingt in Äquatorialebene an (Tetraden ordnen sich an!)
- Verteilung ist zufallsbedingt!

c) Anaphase I

- Homologe Chromosomen weichen auseinander zu den Polen. Dabei entsteht eine beliebige Verteilung.
  Der Unterschied zur Mitose liegt darin, dass nicht 46 Einzelchromosomen in 46 ·2 Chromatiden, sondern 46 Chromosomen (als Tetraden) zu 2 · 23 Chromosomen aufgeteilt werden.
- Am Ende liegt ein haploider Satz von Zwei-Chromatid-Chromosomen an den Polen vor.

d) Telophase I

- Vorübergehende Bildung einer Kernmembran und Zellteilung (manchmal haben die Zellen noch Kontakt!).

Keine anschließende Interphase!

II. Reifeteilung (=Äquationsteilung)

Mitoseähnlicher Vorgang (wie gesagt, ohne Interphase), bei dem dann die 23 Chromosomen in der Anaphase in Schwesterchromatiden getrennt werden.
Es entstehen **vier haploide** Keimzellen (=**Gameten**). Beim Mann werden daraus vier Spermien, bei der Frau eine Eizelle und drei Polkörperchen (welche dann absterben).

Kombinationsmöglichkeiten bei der Meiose:

2 Möglichkeiten für Verteilung des 1. homologen Chromosomenpaares
2 Möglichkeiten für Verteilung des 2. homologen Chromosomenpaares
2 Möglichkeiten für Verteilung des 3. homologen Chromosomenpaares
=> 2 · 2 · 2 = 8 Möglichkeiten

Unterschiede zwischen Mitose - Meiose

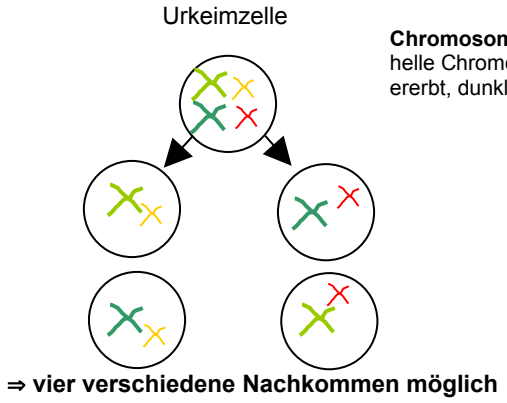
Mitose	Meiose
Wachstumsteilung	Reifeteilung (also zur Produktion von Keimzellen)
Zu finden z.B. beim Wachstum, Muselgewebe-erneuerung, Blutkörperchenbildung, Krebswucherungen usw.	Zu finden bei der Bildung von Eizellen im Eierstock und der Produktion von Spermien im Hoden.
erbgleiche Zellteilung	nicht erbgleiche Teilung => Zellen unterscheiden sich.
Ein Teilungsschritt (bestehend aus Interphase und vier Mitosephasen)	2 Teilungsschritte (aus je zwei Reifeteilungen mit jeweils 4 Phasen - die zweite Reifeteilung entspricht einer Mitose), Es gibt keine Interphase und somit keinen Zellzyklus.
Keine Neukombination des Erbguts.	Neukombination des Erbguts (es findet also eine Durchmischung der eigenen (väterlichen und mütterlichen) Chromosomen statt.
Identische, diploide Tochterzellen entstehen.	Verschiedene, haploide Keimzellen werden gebildet (mit Ein-Chromatid-Chromosomen).
Läuft bei Mann und Frau gleich ab.	Läuft bei Mann und Frau nicht gleich ab.

Funktion und Bedeutung der Meiose (1h)

Wie wichtig die Meiose ist, erkennt man, wenn man einmal eine Beispielrechnung macht:
Jedes Lebewesen hat (wie man ja im Karyogramm sieht) eine bestimmte Anzahl an Chromosomenpaaren. Jedes dieser Paare setzt sich aus je einem väterlichen und einem mütterlichem Chromosom zusammen. Da in der Meiose diese Paare getrennt werden, entstehen Geschlechtszellen mit haploidem Chromosomensatz, die aber von allen Chromosomenpärchen jeweils eines haben!

Beachte: In der Meiose werden die Chromosomenpaare getrennt! Es wird also immer nur von jedem Paar ein Chromosom weitergegeben. Die Auswahl ist dabei zufällig!

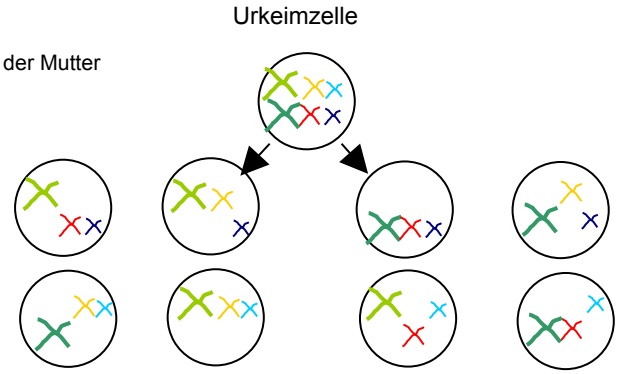
Tier mit 2 Chromosomenpaaren:



⇒ **vier verschiedene Nachkommen möglich**

Chromosomenpaar 1 & 2:
helle Chromosomen sind von der Mutter ererbt, dunkle vom Vater

Die Fruchtfliege hat drei Chromosomenpaare:



⇒ **acht verschiedene Keimzellen möglich**

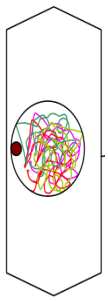
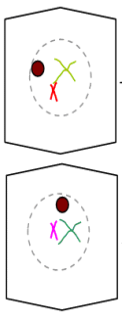
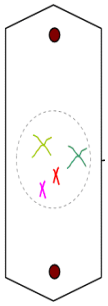
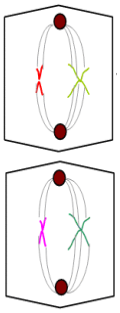
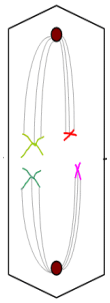
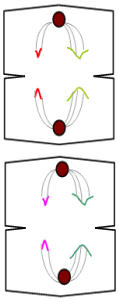
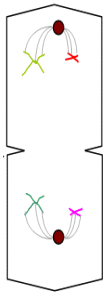
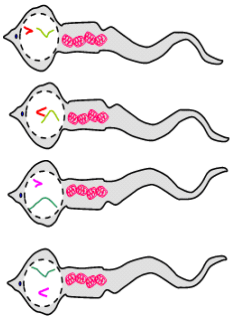
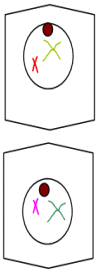
=> 1 Chromosomenpaar => 2^1 = 2 Kombinationsmöglichkeiten
2 Chromosomenpaare => 2^2 = 4 Kombinationsmöglichkeiten
3 Chromosomenpaare => 2^3 = 8 Kombinationsmöglichkeiten
23 Chromosomenpaare => 2^{23} **= 8.386.602** Kombinationsmöglichkeiten

Bei der Befruchtung gibt es also pro Elternpaar $2^{23} \cdot 2^{23}$
(ca. 70 368 774 180 000) Kombinationsmöglichkeiten

Zusammenfassung: Aufgaben der Meiose:

1. Produktion von haploiden Keimzellen (beim Mann = Massenproduktion)
2. Reduktion des diploiden Chromosomensatzes von 46 auf 23 Chromosomen.
3. Sicherung der genetischen Vielfalt durch zufällige Durchmischung der väterlichen und mütterlichen Chromosomen. (Eine weitere Erhöhung der genetischen Vielfalt entsteht dabei durch Crossing-Over)

Aufgaben zur Übung - I - Vervollständige die Tabelle zur Keimzellbildung

1. Reifeteilung (Reduktionsteilung):		2. Reifeteilung (Verdopplung der Gameten):	
	1		6
	2		7
	3		8
	4		9
	5	Ziele der Meiose: 1. 2. 3.	

Wiederholungsfragen zur Mitose und Meiose I

1. Beschreibe den Ablauf und die Aufgaben der Meiose in Worten.
2. Nenne Unterschiede im Ablauf der Eizellen- und Spermienbildung (Tipp: Zeitpunkt, Menge).
3. Nenne wesentliche Unterschiede zwischen Mitose und Meiose.
4. Welche Reifeteilung der Meiose entspricht am ehesten der Mitose? Begründe, warum dieser Schritt in der Meiose wichtig ist.
5. Stelle Vermutungen auf, wo Fehler bei der Meiose auftreten könnten.
6. Berechne die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten bei 6 Chromosomen.
7. Unterscheiden sich Spermium und Eizelle von Urkeimzellen? Erkläre.
8. Erstelle eine beschriftete Skizze eines Chromosoms.
9. Beim Mikroskopieren von gewöhnlichen Zellen kann man manchmal Chromosomen sehen und manchmal nicht? Begründe, warum das so ist.
10. Definiere den Begriff Karyogramm und beschreibe, wie es bei Menschen aussieht.
11. Erkläre den Unterschied zwischen Autosomen und Geschlechtschromosomen.

Meiosekarten

Schneide die Karten aus und finde heraus, wie viel verschiedene Nachkommen möglich sind, wenn man die Eltern hinsichtlich von drei Merkmalen vergleicht:

Gen von ♂ Augenfarbe: blau rezessiv	Gen von ♂ Haarfarbe: blond rezessiv	Gen von ♂ Hautfarbe: hell (mit Sommersprossen) rezessiv
Gen von ♀ Augenfarbe: dunkel (grün oder braun) **dominant**	Gen von ♀ Haarfarbe: braun **dominant**	Gen von ♀ Hautfarbe: dunkel (bräunt leicht) **dominant**

Schneide die Karten aus und finde heraus, wie viel verschiedene Nachkommen möglich sind, wenn man die Eltern hinsichtlich von drei Merkmalen vergleicht:

Gen von ♂ Augenfarbe: blau rezessiv	Gen von ♂ Haarfarbe: blond rezessiv	Gen von ♂ Hautfarbe: hell (mit Sommersprossen) rezessiv
Gen von ♀ Augenfarbe: dunkel (grün oder braun) **dominant**	Gen von ♀ Haarfarbe: braun **dominant**	Gen von ♀ Hautfarbe: dunkel (bräunt leicht) **dominant**

Wiederholungsfragen zur Mitose und Meiose II

1. Beschreibe mit eigenen Worten den Ablauf der Meiose. Nenne anschließend Aufgaben und Ziele. Welche grundsätzliche Bedeutung hat die Meiose?
2. Welche Rolle spielt die Tetrade in der Meiose?
3. Wie unterscheiden sich die Karyogramme, welche zum Zeitpunkt einer frühen bzw. einer späten Metaphase sowie einer Anaphase entstanden sind?
4. Zeichne eine Zelle in der Metaphase I sowie der Anaphase I. Verwende dazu einen von 4 homologen Chromosomenpaaren.
5. Welche Aussage kann zur Länge eines nichtspiralisierten menschlichen Chromosoms getroffen werden, wenn das gesamte Erbgut eines Menschen (pro Zelle!) 2,2m lang ist.
6. Durch welchen Gedankengang lässt sich folgern, dass es in jeder Generation mindestens eine Reduktion des Chromosomensatzes geben muss?
7. Bei der Meiose entstehen haploide Keimzellen. Wie viele mögliche Keimzellen können gebildet werden?
8. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine befruchtete Eizelle nur Chromosomen der beiden Großmütter besitzt?
9. Was versteht man unter Zellzyklus?
10. Nenne Unterschiede zwischen Mitose und Meiose?
11. Inwiefern kann die Häufigkeit von einzelnen Mitosestadien in einem mikroskopischen Präparat einer keimenden Wurzel der Küchenzwiebel eine Aussage zur Dauer der Mitosestadien erleichtern? Nenne Fehlerquellen!
12. Formuliere eigene Fragen zur Steuerung des Zellzyklus sowie der Chromosomenbewegung.
13. Menschenaffen verfügen über 48 Chromosomen, bei ungefähr gleicher DNA-Masse. Welche Vermutung liegt nahe?
14. Die DNA ist aus Basenpaaren aufgebaut. Ein Basenpaar hat eine Gesamtlänge von ca. 0,34µm. Die DNA eines Menschen setzt sich aus ca. 6 Mrd. Basenpaaren zusammen. Wie lang ist ein menschlicher DNA-Faden genau?

Rassen & Arten

Betrachte einmal die Erbsen im Vorratsschrank Deiner Mutter. Sie unterschieden sich in Form und Farbe:
Wie viele verschiedene Erbsenrassen gibt es also? Beschreibe sie: .....

.....

Welche weiteren Lebewesen spalten sich stark in Rassen auf? .....

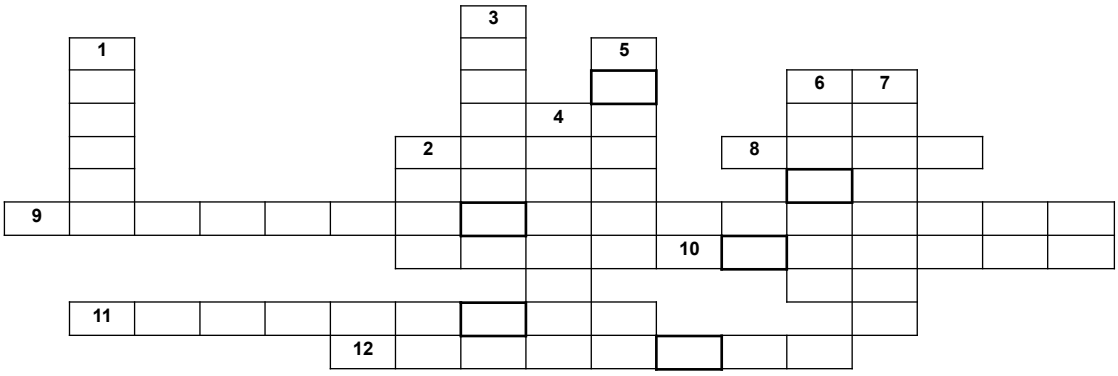
Was ist die Ursache dieser Vielfalt? .....

=> Lebewesen unterscheiden sich in ihren ..... (=**Genotyp**, Erbbild), und zeigen unterschiedliches ..... sowie Eigenschaften, (=**Phänotyp**, Erscheinungsbild).
Solange sie dabei in einer Gruppe ..... Merkmale haben und sie zwischen den Gruppen auch ..... bekommen können, nennt man diese Gruppen „.....“. Gärtner sprechen in diesem Zusammenhang vom ..... verschiedener Rassen. Diese Nachkommen werden auch Rassenbastarde genannt. Alle Lebewesen, die miteinander lebensfähige Nachkommen produzieren können, gehören zu einer ..... . Sind Nachkommen möglich spricht man von verschiedenen „.....“.

Definitionen:

1. **Genetik**: Wissenschaft von der Vererbung,
2. **Gen**: Erbanlage (= Abschnitt auf einem Chromosom)
3. **Genotyp (Erbbild)**: Summe der Erbanlagen eines Organismus
4. **Phänotyp (Erscheinungsbild)**: Gesamtheit der Merkmale.
1. **Haploid:** einfacher Chromosomensatz (z.B. bei Keimzellen der Meiose)
2. **Diploid:** normaler, vollständiger Chromosomensatz (diploid heißt nicht doppelt)

Kreuzworträtsel Genetik



Senkrecht:
1. Den Grundbaustein jeden Lebewesens nennt man...?
2. Eine Eigenschaft innerhalb des Erbgutes.
3. Anderes Wort für „einfacher Chromosomensatz“
4. Fremdwort für Erbbild
5. Anderes Wort für Erbinformation?
6. Eine Gruppe von Lebewesen mit ähnlichen Eigenschaften, die zu einer Art gehören (Plural)
7. Die Summe aller Erbanlagen nennt man...?

Waagerecht
8. Alle Lebewesen, die miteinander lebensfähige Nachkommen produzieren können, gehören zu einer...
9. Die Summe aller Merkmale eines Lebewesens.
10. Dieser Vorgang produziert Spermien und Eizellen.
11. Fremdwort für „Erscheinungsbild“.
12. Der Chromosomensatz fast jeder Körperzelle ist...

Lösungswort: Ohne diesen Vorgang gibt es kein Leben: _____

Rassen & Arten (Lösungsblatt)

Betrachte einmal die Erbsen im Vorratsschrank Deiner Mutter. Sie unterschieden sich in Form und Farbe: Wie viele verschiedene Erbsenrassen gibt es also? Beschreibe sie:

4 vers. Typen, Form (runzlig, rund) und vers. Farbe (gelb, grün)

Welche weiteren Lebewesen spalten sich stark in Rassen auf? *Rinder, Pferde, Hunde, Rosen, Tulpen*

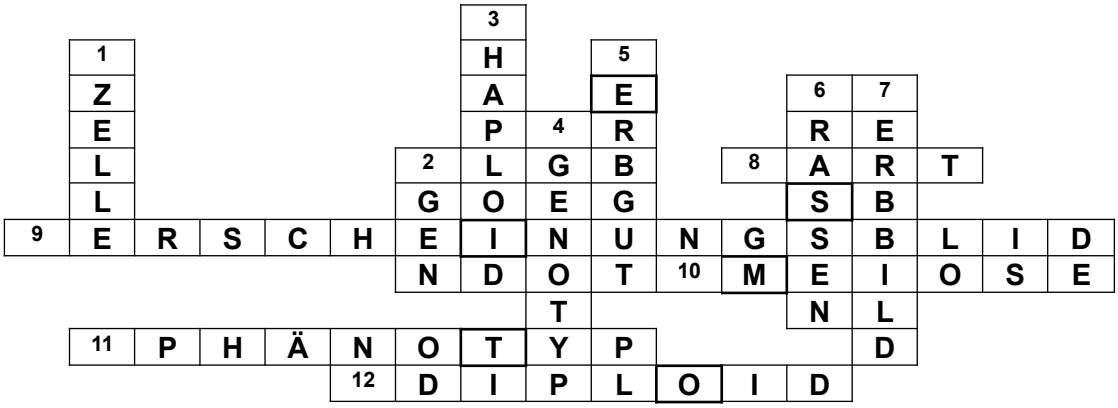
Was ist die Ursache dieser Vielfalt? *vers. Erbanlagen*

=> Lebewesen unterscheiden sich in ihren *Erbanlagen (Genen)* (=**Genotyp**, Erbbild), und zeigen unterschiedliches *Aussehen* sowie Eigenschaften, (=**Phänotyp**, Erscheinungsbild). Solange sie dabei in einer Gruppe *gemeinsame* Merkmale haben und sie zwischen den Gruppen auch *Nachkommen* bekommen können, nennt man diese Gruppen „*Rassen*“. Gärtner sprechen in diesem Zusammenhang vom *Kreuzen* verschiedener Rassen. Diese Nachkommen werden auch Rassenbastarde genannt. Alle Lebewesen, die miteinander lebensfähige Nachkommen produzieren können, gehören zu einer *Art* . Sind Nachkommen möglich spricht man von verschiedenen „*Rassen*“.

Definitionen:

1. **Genetik**: Wissenschaft von der Vererbung.
2. **Gen**: Erbanlage, = Abschnitt auf einem Chromosom.
3. **Genotyp (Erbbild)**: Summe der Erbanlagen eines Organismus
4. **Phänotyp (Erscheinungsbild)**: Gesamtheit der Merkmale.
1. **Haploid:** einfacher Chromosomensatz z.B. bei Keimzellen der Meiose.
2. **Diploid:** normaler, vollständiger Chromosomensatz (diploid heißt nicht doppelter)

Kreuzworträtsel Genetik (Lösung):



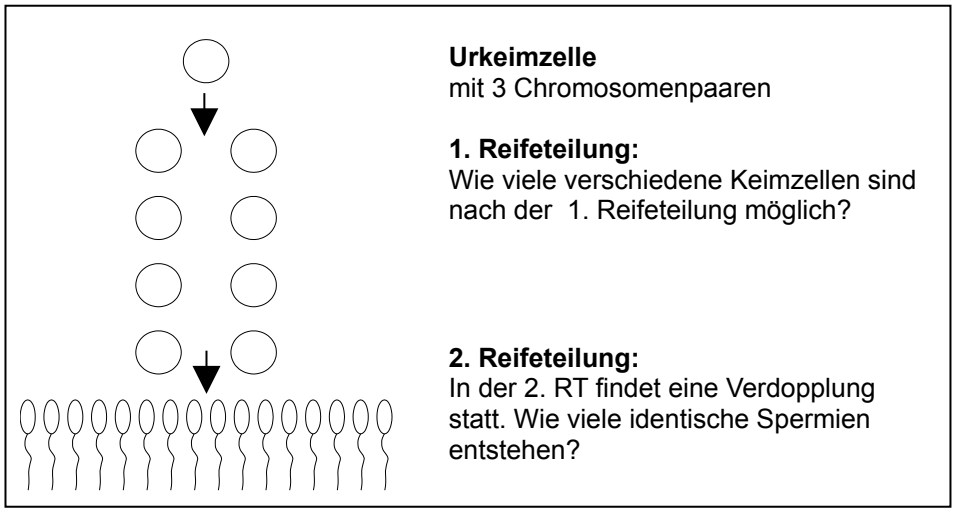
Senkrecht:
1. Den Grundbaustein jeden Lebewesens nennt man...?
2. Eine Eigenschaft innerhalb des Erbgutes
3. Anderes Wort für „einfacher Chromosomensatz“
4. Fremdwort für Erbbild
5. Anderes Wort für Erbinformation
6. Eine Gruppe von Lebewesen mit ähnlichen Eigenschaften, die zu einer Art gehören (Plural)
7. Die Summe aller Erbanlagen nennt man...?

Waagerecht:
8. Alle Lebewesen, die miteinander lebensfähige Nachkommen produzieren können, gehören zu einer...
9. Die Summe aller Merkmale eines Lebewesens
10. Dieser Vorgang produziert Spermien und Eizellen
11. Fremdwort für „Erscheinungsbild“.
12. Der Chromosomensatz fast jeder Körperzelle ist...

Lösungswort: Tipp: Ohne diesen Vorgang gibt es kein Leben: **M i t o s e**

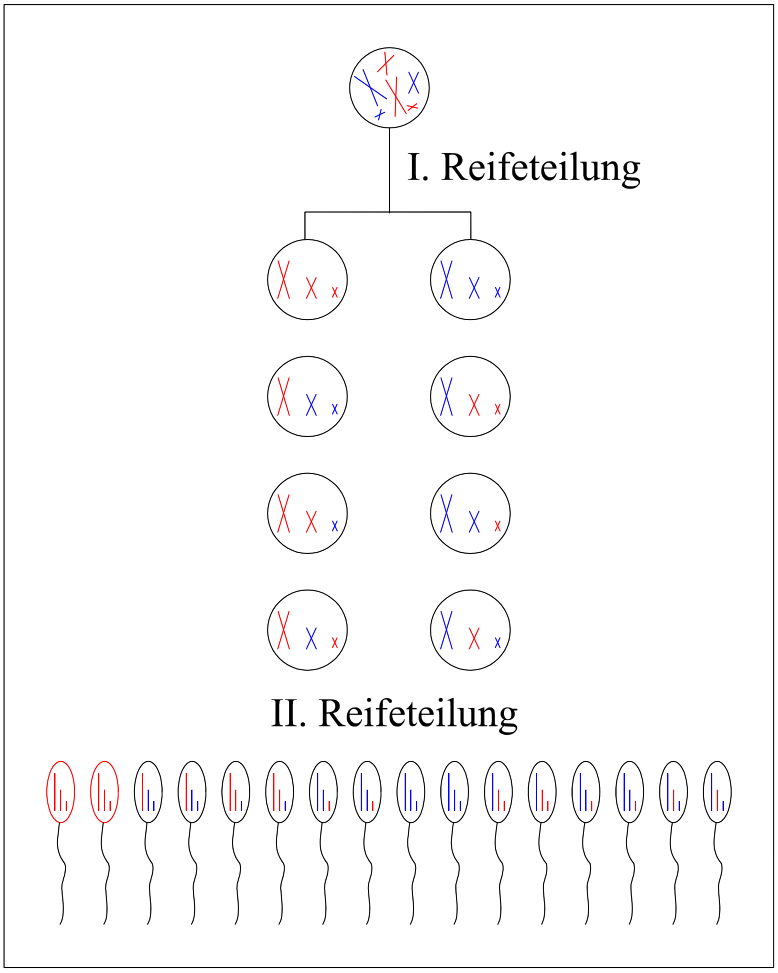
Wiederholungsfragen zum Thema „Einführung in die Genetik und genetische Grundlagen“

1. Beschreibe den Aufbau einer Zelle. Worin unterscheiden sich Einzeller und Vielzeller?
2. Nenne vier Einzeller und Vergleiche ihren Aufbau und ihre Lebensweise.
3. Beschreibe den Aufbau eines Chromosoms und benenne die einzelnen Teile. Wie viele hat der Mensch?
4. Wie unterscheiden sich Mann und Frau aus genetischer Sicht? Suche Unterschiede im Karyogramm.
5. Wie vermehren sich Zellen? Beschreibe genau am Beispiel des Pantoffeltierchens.
6. Was versteht man unter Meiose? Wann geschieht sie und welche wichtigen Aufgaben hat sie?
7. Berechne die Anzahl der genetisch verschiedenen Nachkommen zweier Fruchtfliegem mit 3 Chromosomenpaaren.
8. Was versteht man im biologischen Sinne unter einer Befruchtung?
9. Welcher Partner bestimmt das Geschlecht des Nachwuchses? Begründe mit einem Kreuzungsschema.
10. Wie schützt sich der Körper vor mehrfacher Befruchtung?
11. Beschreibe, wie es zu einer Trisomie 21 kommen kann.
12. Wieso kann man beim Mikroskopieren von Zellen manchmal Chromosomen sehen und manchmal nicht?
13. Was versteht man unter einem Karyogramm? Erkläre am Beispiel des menschlichen Karyogramms.
14. Erkläre den Unterschied zwischen Körperchromosom und Geschlechtschromosomen.
15. Beschreibe den Aufbau von Spermium und Eizelle (Welche Unterschiede gibt es?)
16. Unterschied zur Urkeimzelle?
17. Spermien bewegen sich über den Geißelschlag. Wie kommt aber die Eizelle vom Eierstock zur Gebärmutter?
18. Was ist Mitose und wo findet sie statt?
19. Können bei der Mitose Fehler auftreten? Wo? Was sind Folgen eines Fehlers?
20. Wie schützt sich der Körper vor mehrfacher Befruchtung?
21. Beschreibe die Meiose mit Deinen Worten.
22. Worin besteht der Unterschied zwischen Eizellen- und Spermienbildung?
23. Nenne die Unterschiede zwischen Mitose und Meiose.
24. Welche Reifeteilung entspricht der Mitose?
25. Wo könnten Fehler bei der Meiose auftreten?
26. Zeichne in die Urkeimzelle (farbig!) **3** homologe Chromosomenpaare ein. (Ein Vorschlag zur Unterscheidung: 2 große, 2 mittlere, 2 kleine)



27. Wie viel Kombinationsmöglichkeiten gibt es bei 6 Chromosomen (Fruchtfliege)?
28. Wie unterscheiden sich die Bildung von Eizelle und Spermium?
29. Worin unterschieden sich Spermium und Eizelle von Urkeimzellen?
30. Hat die Meiose bei der Frau überhaupt einen Sinn, wenn ja doch drei Eizellen wieder absterben?
31. Wie lange lebt ein Bakterium, wenn sich Bakterien fast ausschließlich durch Mitose fortpflanzen?
32. Wie kann man Rosen mit Pflanzenblüten züchten, die größer (u.U. doppelt so groß) sind?

Lösung: Freie Verteilung der Erbanlagen



Die zwei Chromosomen eines Homologenpaares werden rein zufällig auf die Tochterzellen verteilt. Spermien und Eizellen besitzen daher individuell verschiedene Erbanlagen.

Bei der Befruchtung entstehen also immer neue Kombinationen. Daher gleichen sich Geschwister nie (Ausnahme: Zwillinge).

Alle folgenden Seiten sind nur noch für die Oberstufe

Oberstufe: Bedeutung der Meiose

1) Reduktion des Chromosomenbestands 2n → 1n
2) Zufällige Neukombination des genetischen Materials (=**Rekombination**)
   (=Durchmischung von mütterlichem und väterlichem Erbgut)
3) Massenproduktion von Keimzellen beim Mann

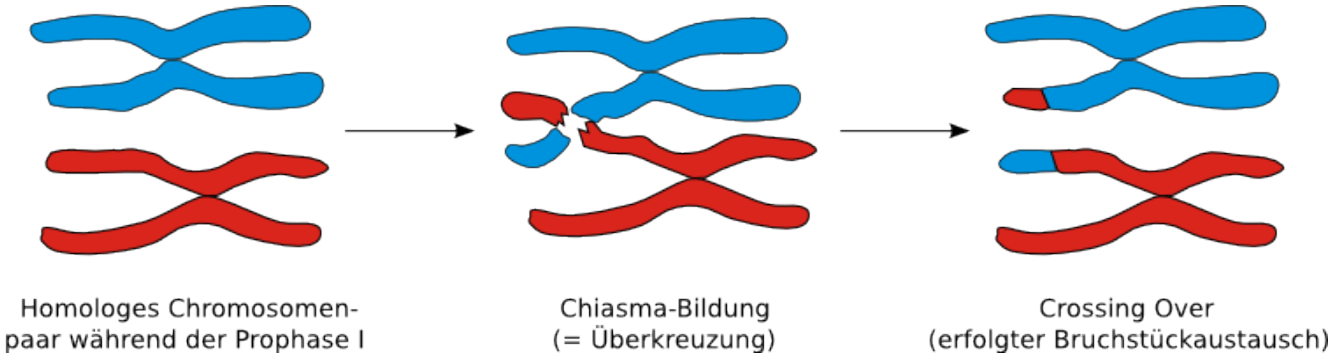
Rekombination

a) Interchromosomale Rekombination

- zufällige Verteilung von ganzen mütterlichen und väterlichen Chromosomen
- entscheidend ist die Metaphase I
- {2^{n-1} mögliche Anordnungen der Chromosomen in der Metaphase; 2^n mögliche Gameten}
- Bei Menschen ist n=23 => 2^{23} = 8 388 608 Kombinationsmöglichkeiten (= 2^{23})

b) Intrachromosomale Rekombination (=Crossing-Over)

Unter Crossing-Over versteht man den Chromatiden-Stückaustauch von Erbinformationen von homologen Chromosomen (zwischen Nichtschwester-Chromatiden untereinander).
Ursache ist eine Überlappung mit einer sogenannten Chiasma-Bildung **während der Prophase 1** der Meiose.

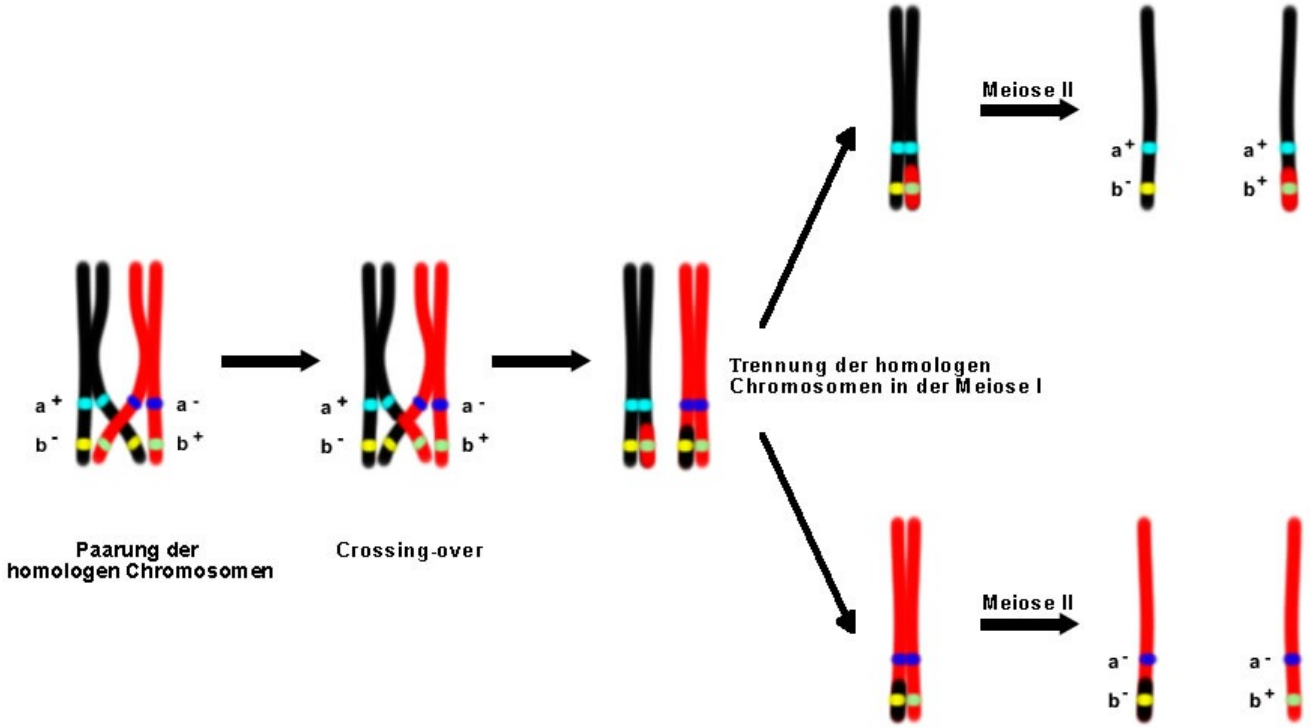


Innerhalb eines Chromosoms wird das Erbgut mit einem anderen (homologen) Chromosom ausgetauscht. Pro Tetrade sind mehrere Austauschungen möglich (d.h. es kann auch mehrfache Überlappungen geben).

Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Crossing_over
https://en.wikipedia.org/wiki/Chromosomal_crossover

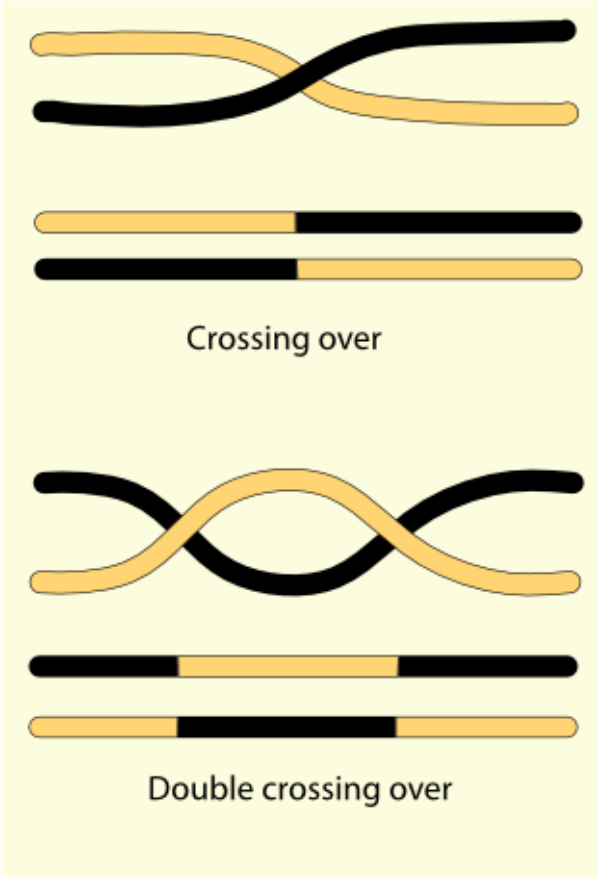
Oberstufe: Grafiken zum Crossing-Over

Die Grafik zeigt die genetische Rekombination der väterlichen und mütterlichen Gene durch Crossing-over während der Frühphase der Meiose I. Im Anschluss findet eine Trennung der homologen Chromosomen und dann die Bildung der Keimzell-1-Chromatid-Chromosomen in der Meiose II statt.
Die zwei Gene a und b sind in ihren Ausprägungen + und - auf den Chromosomen markiert.
Durch Crossing-over entstehen die neuen Allelkombination a+/b+ und a-/b-.



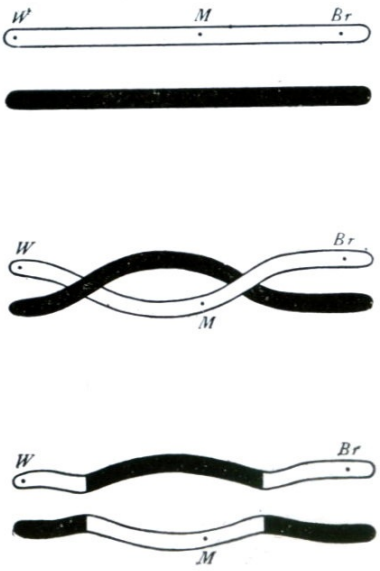
Quelle Bild: Public domain by wikicommonsuser Gebintit - Thank you; https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Cross-over.jpg

Crossing-Over



Quelle Bild: Public domain by wikicommonsueser LadyofHats (Marina Ruiz) - muchas gracias;
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crossover_genes.svg

Double Crossing-Over:



Quelle Bild: Public domain by wikicommonsuser Ragesoss & Thomas Hunt Morgan's *A Critique of the Theory of Evolution* (1916)
https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Morgan_crossover_2.jpg

Unterschiede der Meiose bei Mann und Frau

Bei der Frau erfolgen die Teilung inäqual (ungleich). Das heißt, dass nicht vier gleiche Zellen entstehen.

Warum ist der inäquale Verlauf unproblematisch? (Richtungskörperchen-Eizelle)
Bei der Frau ist keine Massenproduktion notwendig. Da pro Monat nur eine Eizelle heranreift und eine Frau im Alter zwischen 45-60 Jahren keine Eizellen mehr produziert, werden nur 12 Eizellen pro Jahr (in ca. 40 Jahren sind das mal gerade 480 Eizellen!) benötigt.
Der Vorteil liegt aber darin, dass die Eizelle so besonders plasmareich ist, da sie ja Zellplasma von drei weiteren Eizellen enthält. Die ist besonders sinnvoll, da sich bis zur Einnistung (Nidation) selbst versorgen muss (5-6 Tage nach der Befruchtung). Die Richtungskörperchen dienen also nur der Aufnahme von überschüssigem Genmaterial.

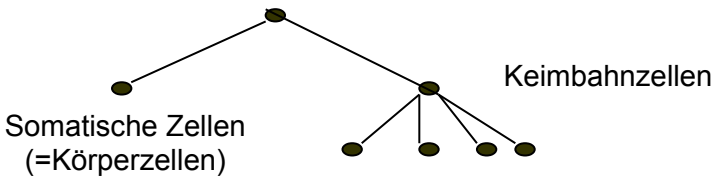
Statistisches zur Keimzellenproduktion

Beim Mann:
- Beginn mit Erreichen der Pubertät
- ca. 1000 Zellen/Sekunde
- kontinuierlicher, ununterbrochen ablaufender Prozess

Bei der Frau:
- Beginn im 4. Embryonalmonat => bis ca. 7. Embryonalmonat (nur 1. Reifeteilung!): Urkeimzellen differenzieren sich zu Oogonien, die noch vor der Geburt in die 1. Reifeteilung eintreten. Es entstehen so genannte Primordialfollikel. Dann folgt ein langes Wartestadium.
- bei der Geburt sind ca. 700.000 Eizellen in ihrer Umhüllung (=Oogonien) vorhanden (festes Kontingent).
- Fortsetzung mit der 2. Reifeteilung dann ab der Pubertät: 40.000 Primärfollikel stehen noch zur Verfügung. Der Rest ist im Laufe der Jahre zugrunde gegangen. Jeden Monat reift nun (meist) einer zur so genannten primäre Oozyten aus und wird dann als Eizelle beim Eisprung freigesetzt.
- => „diskontinuierliche Meiose“

Eine Folge ist eine höhere Fehlerquote bei der Meiose der Frau, da die Eizellen u.a ein insgesamt höheres Alter haben! Neuere Forschungen zeigen aber auch, dass weitere Grunde für Risikoschwangerschaften ausschlaggebend sind.

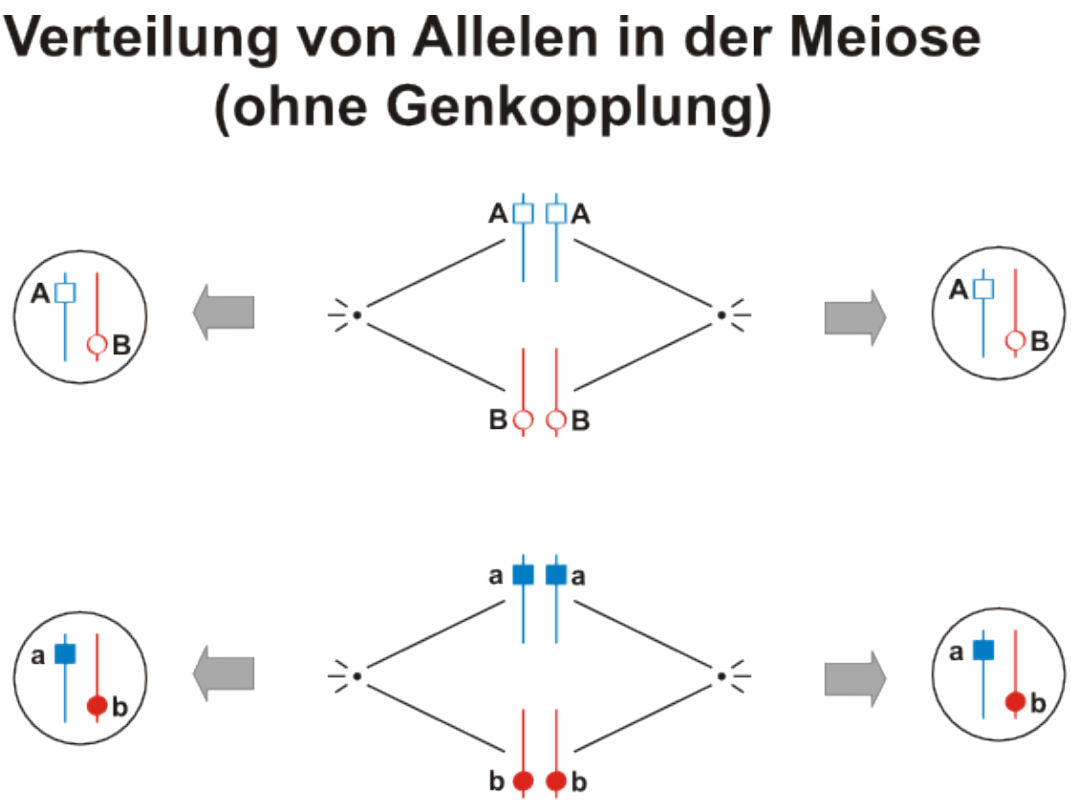
Unterscheidung Somazellen - Keimbahnzellen

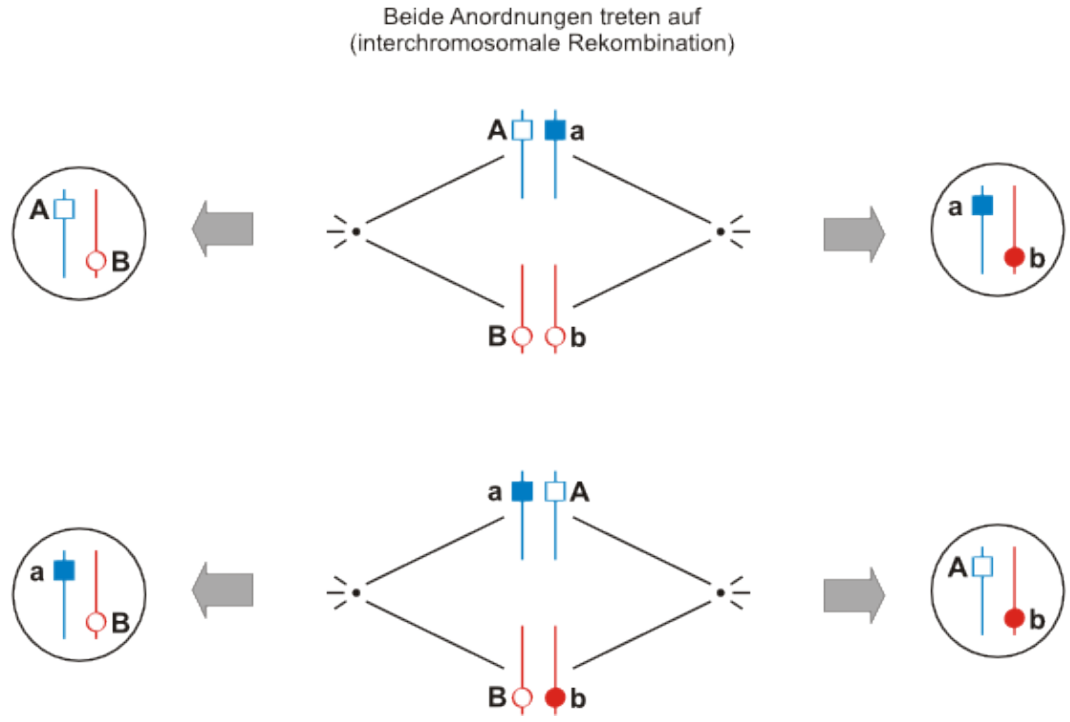


Keimbahnzelle: eine Folge von Zellen, die die Zygote mit den Keimzellen verbindet

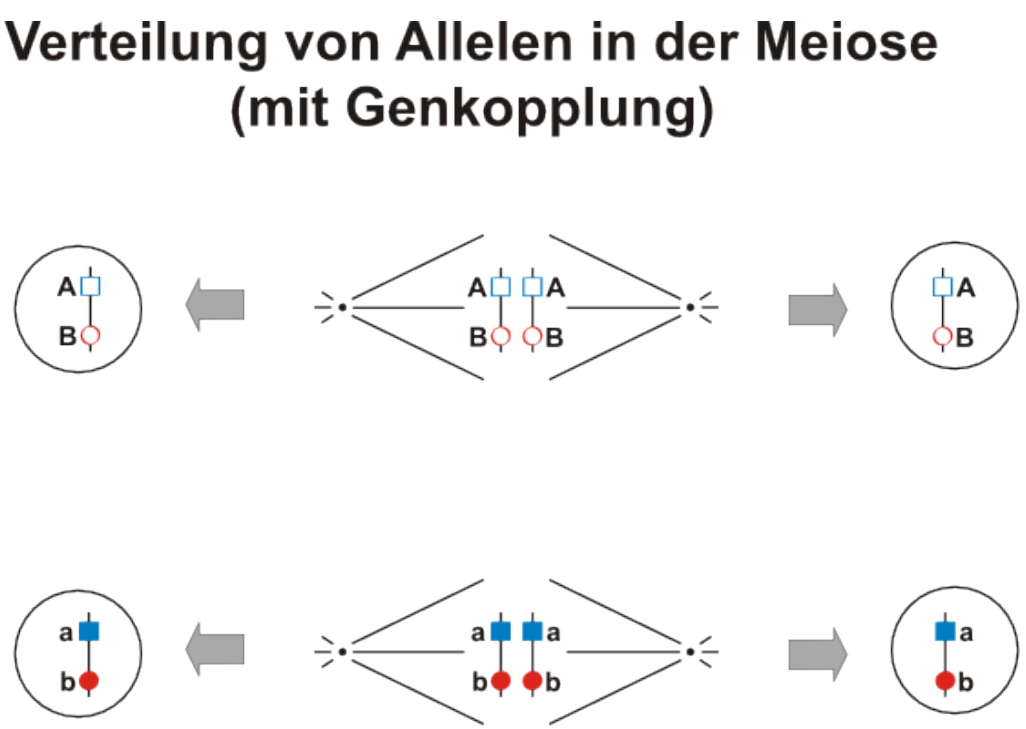
Keimbahnzelle: potentiell unsterblich
Somazelle: sterblich

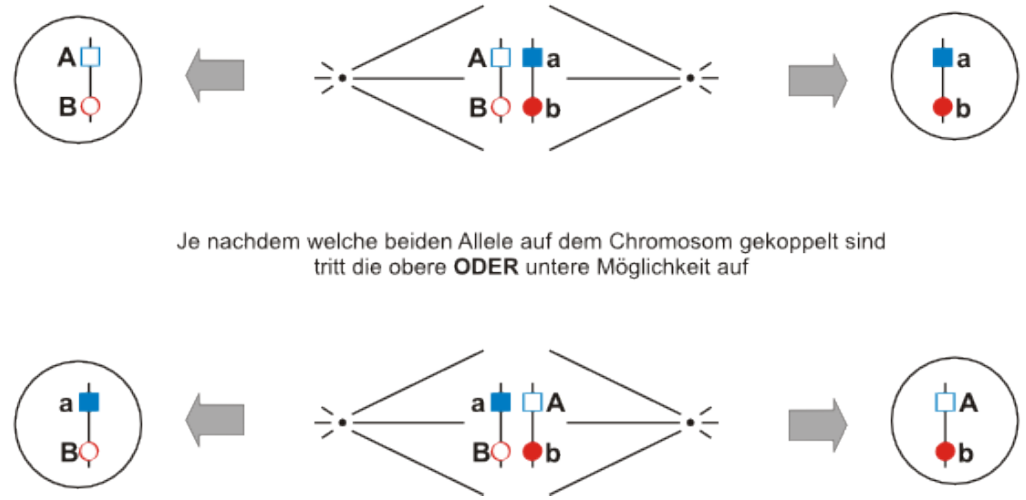
Verteilung von Allelen in der Meiose (ohne Genkopplung)





Verteilung von Allelen in der Meiose (mit Genkopplung)





Apoptose & Nekrose

Ziel: Phänomen „Sonnenbrand“ und „übermäßigem Sonnenbräunen“ als Beispiele für die Apoptose und die Nekrose auf Grundlage von Sachtexten und Schemen verstehen und beide Zelltodformen in einem Vergleich gegenüberstellen.

Der Sonnenbrand

Du kennst sicher das Gefühl, wenn man einen Sonnenbrand hat. Die schmerzende Haut signalisiert uns Verbrennungen,vor denen man sich besser geschützt hätte. Durch die energiereiche UV-Strahlung der Sonne sterben die oberen Hautzellen scheinbar ab und „schälen“ sich von der restlichen Haut ab.

Aber wodurch sterben die Hautzellen eigentlich ab? Denn der Prozess des Abschälens beginnt oft erst Tage nach dem Sonnenbrand! Wären die Zellen durch die Verbrennung abgestorben, müssten sie unter Umständen auch schwarz sein und vor allem sofort abgestorben sein. Das sind sie aber nicht!

Da nur defekte Hautzellen absterben, welche durch UV-Licht eine Schädigung ihres Erbgutes erfahren haben, liegt die Vermutung nahe, dass es sich um einen biologischen Prozess handelt, der zum Absterben der defekten Zellen (und zwar nur dieser!) führt!

Man kennt mittlerweile zwei Prozesse, die defekte Zellen entfernen! Apoptose und Nekrose.

Sonnenbrand und übermäßiges Sonnenbräunen lösen die Zelltodformen der Apoptose und Nekrose aus. Bei beiden Formen werden Zellen abgebaut.

Solche Prozesse des Zelltods laufen sehr häufig im Körper ab!
Ein 80-jähriger Mann würde ohne den Prozess der Apoptose ca. 80t wiegen. Alleine Pro Tag werden 10 Mrd. Zellen vom Körper auf diese Weise entfernt!

Apoptose – wie sterben Zellen ab?

Aufgabe: Beschreibe die Vorgänge der Apoptose und ergänze die Abbildungen mit stichpunktartigen Anmerkungen.

Im Körper des Menschen laufen Prozesse ab, welche bestimmte, unerwünschte oder geschädigte Zellen beseitigt. Diese Vorgänge sind recht schwer zu beobachten, da man vorher nicht weiß, wo sie stattfinden.

Man nennt den Vorgang der selektiven Zelltötung **Apoptose** (gr.: apoptosis abfallen).
Sie ist ein von der Zelle **geregelter, kontrollierter und aktiver Prozess**, der zum Absterben der Zelle führt. Die Apoptose wird von der Zelle selbst induziert (also selbst in Gang gesetzt) und somit auch als programmierter Zelltod bezeichnet (=auch „Selbstmord“ der Zelle liest man hin und wieder).

Für die Entdeckung der Apoptose, also des programmierten, freiwilligen Zellsterbens erhielten 2002 Sydney Brenner, H. Robert Horvitz und John E. Sulston den Nobelpreis für Medizin. Dieser Vorgang ist in tierischen Organismen ein Selbstmordprogramm, welches von einer biologischen Zelle im Gegensatz zur Nekrose selbst durchgeführt wird und die Zelle innerhalb weniger Stunden vollständig eliminiert.

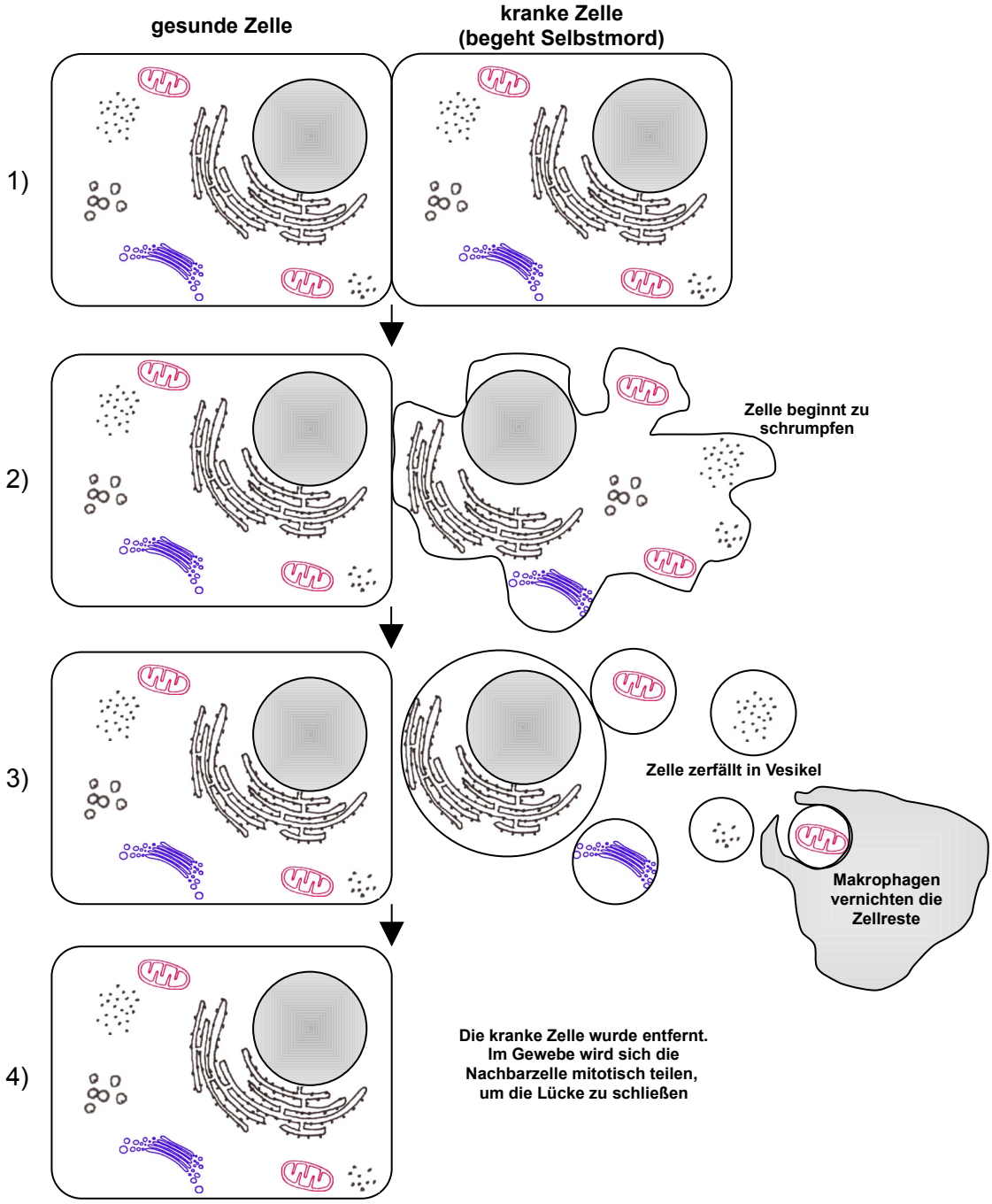
Die Apotose beginnt mit einer Verringerung des Zellvolumens. Zellplasma, Zellkern und Mitochondrien schrumpfen und die betroffenen Zellen verlieren den Kontakt zu ihren Nachbarzellen. Ursache sind spezifische Enzyme, welche die DNA und Proteine in Bruchstücke zerlegen. Die Zellmembran hingegen bleibt während den Vorgängen der Apoptose vorerst intakt.
Allerdings bilden sich dort mehrere Ausstülpungen, die sich als geschlossene Vesikel, sogenannte Apoptosekörperchen, von der Zelle abschnüren. Makrophagen des Immunsystems nehmen diese Vesikel auf und verdauen sie, bis die gesamte Zelle auf diese Weise aufgelöst ist.

Die Apoptose wird durch Gene geregelt. Das **Protein p53** besitzt dabei eine Schlüsselfunktion. Es wird als„Wächter des Erbguts“ bezeichnet, weil es so etwas wie eine „Notbremse“ des Zellzyklus ist.
Im Detail sorgt es dafür, dass die in der S-Phase verdoppelte DNA von genau diesem Protein auf deren Vollständigkeit geprüft wird. Hat die so produzierte DNA Schäden, was z.B. auch als Folge von dauerhafter Sonneneinstrahlung eintreten könnte, wird das Protein p53 vermehrt produziert und so der Übergang in die Mitosephasen damit blockiert. Weitere Proteine werden daraufhin aktiviert, die dann den Zelltod einleiten!

Die Apoptose ist ein von der Zelle selbst ausgelöster Zelltod, der verhindern soll, das defekte DNA nicht über Mitose weiter vermehrt wird.

Nekrose und Apoptose lassen sich optisch leicht unterscheiden. Während bei der Apoptose ein Schrumpfen der Zelle einsetzt und eine Zerteilung der DNA durch Endonukleasen in definierte Stücke stattfindet, schwillt bei der Nekrose die Zelle an, wobei deren Plasmamembran zerstört wird. Als Folge von Nekrosen kommt es oft zu Entzündungen, da hierbei Zellplasma und Zellorganellen freigesetzt werden, welche durch Makrophagen (Fresszellen) entsorgt werden. In der Folge kommt es zur Entzündung.
Im Vergleich zur Nekrose, ist die Apoptose die häufigere Form des Zelltods.

Ablauf der Apoptose im Gewebe



Beispiele für Apoptose:

Die Apoptose gehört genau wie die Mitose zum Wachstum und zur Organismusfunktion eines Lebewesens hinzu. Sie ist Teil der Zelldifferenzierung und hilft bei der exakten Ausbildung von Geweben und Organen. Durch sie werden z.B. die Fingerzwischenhäute schon als Embryo entfernt. Es liegt also ein Gleichgewicht von Vorgängen des Zellsterbens und der mitotischen Neubildung von Zellen vor.

a) Bei der Embryonalentwicklung und dem Heranwachsen wird beispielsweise bei der Entwicklung von menschlichen Gliedmaßen eines Embryos zuerst sogenannte plattenförmige Gewebsknospen ausgebildet, die an den Finger- und Zehenzwischenräumen absterben und so die Gliedmaßen ihre endgültige Form ausbilden können. Weitere Beispiele sind die Umwandlung von der Kaulquappe zum Frosch, (offenbar) der Zelltod der Zellen von Glaskörper und Linse des Wirbeltierauges, was für die Durchsichtigkeit der Augenlinse verantwortlich ist, die Gewährleistung der richtigen Verschaltung von einzelner Nervenzellen bei der Entwicklung des Gehirns.

b) Im erwachsenen Organismus dient sie der Kontrolle der Zellzahl und der Gewebsgröße (dies verhindert das Auftreten von Wucherungen), der Verjüngung von Geweben (z. B. Riechepithel der Nase, Regeneration von Muskelgewebe nach stärkerer Beanspruchung) und zur Auswahl von geeigneten Keimzellen (ca. 95% der Keimzellen werden vor dem Erreichen ihrer Reife apoptotisch getötet!)

c) Bei der Immunabwehr werden Keime durch B-Lymphozyten (z.B. Fresszellen) bekämpft. Danach werden die B-Lymphozyten zum Teil nicht mehr benötigt und durch Apoptose entfernt. Die Immunantwort wird somit abgeschaltet.
Würde dies nicht geschehen, könnten die B-Lymphozyten körpereigenes Gewebe angreifen (man vermutet dies als eine Ursache von Rheuma!). Man spricht von sogenannten Autoimmunerkrankungen.

d) Die Eliminierung entarteter Zellen, welche durch Mutationen, Strahlung, Gifte oder virale Infekte geschädigt sind, geschieht offenbar auch durch **Apoptose.** Die Krebsforschung versucht, sich dies für kommende Behandlungsformen nutzbar zu machen.

Die Apoptose ist ein wesentlicher Bestandteil der Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen und der Eigenkontrolle des Immunsystems. Verminderte Apoptose kann zum Auftreten von Autoimmun- und Tumorerkrankungen führen.

Nekrose – wie sterben Zellen ab?

Aufgabe: Beschreibe die Vorgänge der Nekrose und ergänze die Abbildungen mit stichpunktartigen Anmerkungen.

Die Nekrose ist ein Prozess, bei dem die geschädigte Zelle oder oft ganze Zellgruppen durch **äußere Faktoren zerstört werden**. Ursachen können mechanische Beschädigungen, Verbrennungen, Verätzungen, Vergiftungen oder Infektionen sein.

Als erstes beobachtet man bei der Nekrose eine Volumenzunahme der Zelle. Ursache ist das Eindringen von Ionen (wie beispielsweise Calcium und Natrium) durch die Zellmembran. Die Konsequenz ist, verursacht durch die hohe Ionenkonzentration, ein osmotischer Wassereintritt. Durch diesen schwillt die gesamte Zelle an, bis die Zellmembran schließlich platzt und die Membran dabei ganz zerstört wird.

Die Nekrose ist eine Form des Zelltods, die mit einer Membranschädigung einsetzt und dann durch übermäßige Wasseraufnahme zum Platzen der Zelle führt.

Die so freigesetzten Stoffe, Cytoplasmareste und nun freie Zellorganellen, locken die Makrophagen. Diese sind Bestandteil des Immunsystems und beginnen sofort die ehemaligen Zellinhalte aufzunehmen und zu entsorgen. Dabei sterben sie oft ab und werden zu Eiter. Eine Entzündungsreaktion ist meist die Folge, die auch benachbartes gesundes Gewebe betreffen kann. In der Regel bildet sich daraufhin eine Wunde.

Nekrosen sind eine Reaktion auf äußere Einwirkungen (z.B. durch Sonnenstrahlung) oder äußeren Verletzungen. Sie werden also nicht vom Körper induziert. Nekrosen laufen ungesteuert, **passiv und unkontrolliert** ab.

Erkrankungen mit erhöhter Apoptoserate:

- Virushepatitis B, C und D
- Alkohol-induzierte Hepatitis
- Autoimmunhepatitis
- Zirrhose
- Morbus Wilson (=Kupferspeicherkrankheit)
- Akutes Leberversagen

Erkrankungen mit erniedrigter Apoptoserate:

- Hepatozelluläres Karzinom
- Cholangio-Karzinom
- Kolonkarzinom
- Pankreas-Karzinom
- Chemotherapieresistenz

Vergleich von Apoptose und Nekrose

Apoptose	Nekrose
Die Apoptose wird von der Zelle selbst ausgelöst.	Durch äußere Faktoren ausgelöst (z.B. Sonnenbrand, Viren, Bakterien, Verbrennungen usw.).
DNA wird zerteilt, sodass keine Mitosen mehr möglich sind, dann wird Zelle in Kügelchen zerlegt.	Mehrere Arten des Zelltods möglich: Häufig: Zelle schwillt an, bis sie platzt.
Keine Entzündungsreaktionen.	Unter Umständen Entzündungsreaktionen (verschiedene Typen möglich, je nach Gewebe).
Enzyme (p53) leiten Apoptose ein und aktivieren andere Enzyme, welche sie durchführen.	
p53 ist das Kontrollprotein.	
Die Apoptose kann in einigen Fällen auch Krebs auslösen.	Kann zu Krebs führen.
Apoptose kommt in allen Gewebetypen vor (auch Nervengewebe).	
Fresszellen (Makrophagen) fressen Zellreste.	Makrophagen fressen Zellreste.

Das Protein p53

Eine besondere Rolle für die Apoptose spielt das Enzym P53. Es überprüft in der S-Phase des Zellzyklus die DNA auf Vollständigkeit. Ist die DNA beschädigt, leitet das Protein die Apoptose ein, indem es den Übergang in die folgende Mitosephase verhindert. Dann werden weitere Proteine aktiviert, welche den Zelltod einleiten. Dies verhindert z.B. die weitere Verbreitung defekten Erbguts und schützt so vor Krebs. Ist aber p53 direkt von einer Veränderung (Mutation) betroffen, unterbleibt das Signal am Ende der S-Phase, so dass es zur Zellvermehrung und evtl. Krebs kommen kann.

Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Apoptose
https://en.wikipedia.org/wiki/Apoptosis
https://www.zum.de/Faecher/Materialien/hupfeld/index.htm?/Faecher/Materialien/hupfeld/Cytologie/Apoptose/apoptose.html