

Inhalt

| | |
|----------------------|----------|
| Vorwort | 7 |
|----------------------|----------|

| | |
|---------------------------------------|----------|
| A Die Struktur der Zelle | 9 |
|---------------------------------------|----------|

| | |
|--|----|
| 1. Die Entwicklung der Cytologie und die Zelle als kleinste Einheit des Organismus | 9 |
| 2. Das lichtmikroskopische Bild der Zelle | 11 |
| 2.1 Die Grundstruktur der Zelle | 11 |
| 2.2 Pflanzen- und Tierzelle im Vergleich | 13 |
| 2.3 Der Aspekt der Dreidimensionalität | 15 |
| 3. Das elektronenmikroskopische Bild der Zelle | 16 |
| 3.1 Pflanzliche und tierische Zellen | 17 |
| 3.2 Bau und Funktion der Zellorganellen | 18 |
| 3.2.1 Zellkern | 18 |
| 3.2.2 Mitochondrien | 19 |
| 3.2.3 Plastiden | 19 |
| 3.2.4 Endoplasmatisches Retikulum (ER) | 20 |
| 3.2.5 Ribosomen | 21 |
| 3.2.6 Dictyosomen/GOLGI-Apparat | 21 |
| 3.2.7 Lysosomen | 22 |
| 3.2.8 Mikrotubuli/Centriolen | 24 |
| 3.2.9 Zellskelett | 25 |
| 3.3 Die Größe von Zellen | 28 |
| 3.4 Der Struktur-Funktions-Aspekt | 29 |
| 3.5 Zusammenfassung | 33 |
| 4. Prokaryoten – Eukaryoten | 34 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| B Die Dynamik der Zelle | 36 |
|--------------------------------------|-----------|

| | |
|--|----|
| 1. Der Zellzyklus | 36 |
| 1.1 Die Abschnitte der Interphase | 38 |
| 1.2 Regelung des Zellzyklus | 39 |
| 1.3 Zellalterung | 40 |
| 2. Die Mechanik der Zellteilung – Mitose | 40 |
| 2.1 Der Mitoseablauf | 44 |
| 2.1.1 Prophase | 44 |
| 2.1.2 Prometaphase | 44 |
| 2.1.3 Metaphase | 44 |
| 2.1.4 Anaphase | 44 |
| 2.1.5 Telophase | 44 |
| 2.2 Die Cytokinese | 45 |
| 2.2.1 Furchung | 45 |
| 2.2.2 Zellwandbildung bei Pflanzen | 45 |
| 2.2.3 Inäquale Cytokinesen | 46 |
| 2.3 Theorien zur Chromosomenbewegung | 46 |
| 2.3.1 Hemmung der Chromosomenbewegung | 46 |
| 2.3.2 Der Spindelfaserapparat | 46 |

| | |
|---|------------|
| 2.3.3 Chromosomentrennung..... | 47 |
| 3. Zelldifferenzierung..... | 48 |
| 3.1 Differenzierung pflanzlicher Zellen..... | 49 |
| 3.2 Differenzierung tierischer Zellen..... | 50 |
| 4. Programmierter Zelltod (Apoptose)..... | 51 |
| 5. Zusammenfassung..... | 54 |
| C Chemie der Bau- und Inhaltsstoffe..... | 56 |
| 1. Grundlagen der Chemie der Zelle..... | 56 |
| 2. Zucker – die Nährstoffmoleküle der Zelle..... | 57 |
| 3. Fettsäuren – die Baustoffe für Membranen..... | 59 |
| 4. Aminosäuren – die Bausteine der Proteine..... | 60 |
| D Biomembranen..... | 66 |
| 1. Diffusion, Osmose und Semipermeabilität..... | 66 |
| 2. Plasmolyse – die Zelle als osmotisches System..... | 73 |
| 3. Eigenschaften von Biomembranen..... | 75 |
| 4. Zusammenfassung..... | 76 |
| 5. Struktur und Funktion der Biomembran..... | 77 |
| 5.1 Die Lipiddoppelschicht..... | 78 |
| 5.2 Membranproteine..... | 83 |
| 5.3 Transportmechanismen für kleine Moleküle und Ionen..... | 85 |
| 5.4 Membrantransport von Makromolekülen und Partikeln..... | 94 |
| E Einzeller – Kriterien des Lebens..... | 98 |
| 1. Einzeller..... | 98 |
| 1.1 Die Rhizopoden..... | 98 |
| 1.2 Die Flagellaten..... | 99 |
| 1.3 Die Ciliaten..... | 99 |
| 2. Kriterien des Lebens..... | 100 |
| F Zellbiologie des Immunsystems..... | 102 |
| 1. Grundlagen der Immunbiologie..... | 102 |
| 2. Die Zellen des Immunsystems..... | 103 |
| 3. Der Ablauf einer Immunreaktion..... | 104 |
| 4. Die erworbene Immunität..... | 107 |
| 4.1 Lymphocyten..... | 107 |
| 4.2 Die Theorie der klonalen Selektion..... | 107 |
| 4.3 B-Zellen und die humorale Immunreaktion..... | 108 |
| 4.3.1 Aufbau und Eigenschaften der Antikörper..... | 111 |
| 4.3.2 Molekulare Ursachen der Antikörpervielfalt..... | 114 |
| 4.4 T-Zellen und die zelluläre Immunreaktion..... | 117 |
| 4.4.1 T-Zell-Rezeptoren..... | 117 |
| 4.4.2 Die MHC-Restriktion von T-Zellen..... | 118 |
| 4.5 Steuerung der Immunreaktionen..... | 120 |
| 4.5.1 Die Aktivierung der T-Zellen..... | 121 |
| 4.5.2 Die Aktivierung der B-Zellen..... | 123 |
| 4.5.3 Abschalten von Immunreaktionen..... | 123 |
| 4.6 Ursachen der Immuntoleranz..... | 124 |
| 4.7 Abwehrmaßnahmen gegen Bakterien und Viren..... | 124 |

| | |
|--|------------|
| 4.7.1 Abwehrmaßnahmen gegen Bakterien..... | 124 |
| 4.7.2 Abwehrmaßnahmen gegen Viren..... | 125 |
| 5. Zusammenfassung..... | 126 |
| G Das Mikroskop als Analyseinstrument..... | 128 |
| 1. Die Lichtmikroskopie: Auge, Lupe und Mikroskop – einfache physikalische Grundlagen..... | 128 |
| 2. Die Elektronenmikroskopie..... | 133 |
| 3. Die Güte von Lichtmikroskopen – der Kauf eines Lichtmikroskops..... | 136 |
| 4. Tipps zum Mikroskopieren..... | 137 |
| 4.1 Darstellung des Zwischenbildes..... | 137 |
| 4.2 Bestimmen des Gesichtsfelddurchmessers..... | 138 |
| 4.3 Untersuchung unterschiedlicher Substanzen..... | 138 |
| 4.4 Regeln zur Mikroskopie..... | 139 |
| Quellenverzeichnis | 141 |
| Literaturverzeichnis | 142 |
| Lösungen zu den Aufgaben | 145 |
| Glossar | 152 |
| Register | 156 |

B Die Dynamik der Zelle

Jeder erwachsene Mensch besteht aus rund 60 Billionen Zellen. Diese Zellen sind durch **Zellteilungen** nach der Befruchtung einer einzigen Eizelle entstanden. Zellteilungen sind jedoch nicht nur für das Wachstum

eines Embryos bzw. Menschen erforderlich, auch im Erwachsenenstadium sind ständig weitere Zellteilungen nötig, um den natürlichen Verschleiß zu ersetzen. Das gilt für alle vielzelligen Organismen.

Aufgabe

Bo1

Bei einem erwachsenen Menschen sterben täglich ca. 2 % der Zellen ab und müssen wieder ersetzt werden. Berechnen Sie die Zahl der Zellteilungen pro Sekunde!

Die Teilungshäufigkeit verschiedenartiger Zelltypen ist dabei unterschiedlich. Nerven- und Skelettmuskelzellen vermehren sich überhaupt nicht mehr; ihr Verschleiß ist sehr gering. Leberzellen erneuern sich normalerweise ein- bis zweimal pro Jahr, manche Darmepithelzellen verdoppeln sich sogar mehrmals pro Tag, um so für die ständige Erneuerung der Darminnenwand zu sorgen. Andere Zellen liegen in ihrem Teilungsverhalten irgendwo zwischen diesen Extremen, können allerdings durch innere Faktoren

(Hormone) und äußere Einflüsse zu erhöhten Teilungsfolgen gebracht werden. So löst zum Beispiel Blutverlust eine extreme Vermehrung der Erythrocyten aus.

Kommt die Zellteilung eines Lebewesens beispielsweise durch hohe Dosen ionisierender Strahlen (Radioaktivität) vollständig zum Erliegen, stirbt der Organismus innerhalb weniger Tage. Die Fähigkeit und Durchführung von Zellteilungen stellt damit bei höheren Lebensformen ein Kriterium für „Lebendig sein“ dar.

1. Der Zellzyklus

Da alle vielzelligen Lebewesen ursprünglich aus jeweils einer einzigen befruchteten Eizelle (**Zygote***) hervorgegangen sind, muss es einen Mechanismus geben, der die **Ver-**

mehrung der Zellen und damit **Wachstum** ermöglicht.

Die einzelne Zelle löst dieses Problem auf scheinbar sehr einfache Weise, „sie teilt

sich“ in zwei **Tochterzellen**. Dieser Vorgang lässt sich bei **Einzellern** gut beobachten: Diese teilen sich „einfach in der Mitte durch“ und haben sich damit verdoppelt (vgl. Kap. E).

Die Verdopplung der meisten Zellbestandteile bedarf keiner genauen Steuerung. Wenn es von Zellorganellen oder bestimmten Molekülen eine große Anzahl gibt, reicht es in der Regel aus, wenn sich ihre Zahl in jedem Teilungszyklus annähernd verdoppelt und der Zellinhalt bei der Durchtrennung in zwei etwa gleich große Tochterzellen aufgeteilt wird. Das Problem besteht darin, dass die neu gebildeten Zellen auch wirklich das **gleiche Erbgut** wie die Mutterzelle besitzen, also **genetisch identisch** sind.

Deshalb muss die Erbsubstanz (DNA) zunächst verdoppelt und anschließend auf die beiden neuen Zellen exakt verteilt werden. Um dies zu bewirken, ist ein spezieller Mechanismus erforderlich.

Betrachtet man das Leben einer Zelle als eine Abfolge von immer wiederkehrenden Vorgängen, so kann man zwei Zyklen unterscheiden: den **cytoplasmatischen Zyklus** und den **Chromosomenzyklus**.

Der cytoplasmatische Zyklus besteht aus dem **Zellwachstum** – der Vermehrung aller cytoplasmatischen Strukturen – und der **Cytokinese** – der Durchtrennung der Zelle bei der Teilung. Der Chromosomenzyklus besteht ebenfalls aus zwei Phasen, in der **Synthesephase** wird das Erbgut, die DNA, verdoppelt, erst dann folgt die **Mitose***. Sie entspricht dem Vorgang, der letztlich zur Auftrennung und Verteilung des Erbgutes auf die beiden Tochterzellen führt.

Wie wir bereits wissen, ist der Zellkern als deutlich abgegrenzte Struktur im Innern der Zellen schon mit dem Lichtmikroskop gut zu erkennen (vgl. Kap. A. 3.2.1). Auch die Zellteilung lässt sich lichtmikroskopisch gut verfolgen; sie stellt ein beeindruckendes Schauspiel dar (vgl. Abb. 27).



Abb. 27
Zellen in verschiedenen Mitosestadien (schematisch)

In der Mitose wird die Struktur des Erbgutes sichtbar; der Zellkerninhalt verdichtet sich und kondensiert zu den so genannten **Chromosomen*** (vgl. Abb. 33). Durch einen koordinierten Bewegungsablauf wird das Erbgut exakt auf die beiden neu entstandenen Tochterzellen verteilt. Normalerweise schließt sich an diese Verteilung der Chromosomen die **Cytokinese** direkt an; es entstehen zwei neue Zellen.

Im Lebenszyklus einer Zelle stellen Mitose und Cytokinese meist nur einen sehr kurzen Abschnitt dar: die **M-Phase (Mitose-Phase)**.

Die weitaus längste Zeit befindet sich die Zelle im Stadium der so genannten **Interphase**, die im lichtmikroskopischen Bild ruhig und ereignislos erscheint. Tatsächlich laufen in dieser Phase eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessen ab: Der Kern geht seiner Steuerungsfunktion nach, koordiniert alle physiologischen Vorgänge in der Zelle und bereitet die Zelle auf die nächste Zellteilung vor.

1.1 Die Abschnitte der Interphase

Das Erbgut, die DNA, wird in den meisten untersuchten Zellen nur in einem bestimmten Zeitabschnitt während der Interphase verdoppelt, also repliziert; diese Phase wird als **S-Phase** (Synthese-Phase) bezeichnet.

Zwischen dem Ende der M-Phase mit der vollzogenen Zelldurchtrennung in der Cytoinese und dem Beginn der Synthese-Phase befindet sich die Zelle in einer „Arbeitsphase“, der **G₁-Phase** (G = gap; engl. Lücke).

Ein ähnlicher Abschnitt existiert meist auch zwischen dem Ende der S-Phase und dem Beginn der nächsten M-Phase. Dieser Zeitabschnitt wird als **G₂-Phase** bezeichnet.

Die gesamte Interphase, bestehend aus G₁ + S + G₂, macht zeitlich oft mehr als 90 % des Zellzyklus aus. Bei sich schnell teilenden Zellen höherer Lebewesen dauert die M-Phase ca. 1 bis 2 Stunden. In der M-Phase ist das Erbmaterial innerhalb der Chromosomen so stark kondensiert, dass der Zellstoffwechsel

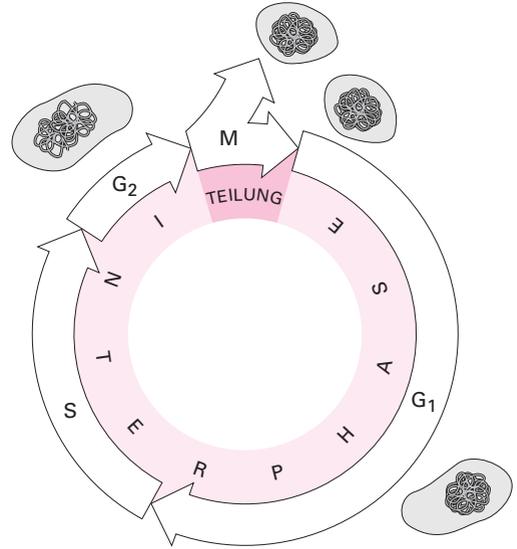


Abb. 28
Die Phasen des Zellzyklus

nicht gesteuert werden kann – eine RNA-Synthese findet nicht mehr statt.

Besonders die G₁-Phase kann extrem lang sein, die Zellen scheinen dann vollständig zu ruhen und überhaupt keinen Vermehrungszyklus mehr zu durchlaufen.

Aufgabe

B02

In der nachfolgenden Tabelle ist die ungefähre Dauer der einzelnen Phasen des Zellzyklus von einigen Zelltypen aus dem menschlichen Körper aufgelistet.

- Wovon hängt die Länge der Zellzyklen bei den einzelnen Zelltypen ab?
- Wie lässt sich dieser Befund erklären?

| Zelltyp | Dauer der Phase (in Stunden) | | | | |
|--------------------------|------------------------------|----------------|---|----------------|---|
| | Gesamtzyklus | G ₁ | S | G ₂ | M |
| Knochenmark ^o | 13 | 2 | 8 | 2 | 1 |
| Dünndarm | 17 | 6 | 8 | 2 | 1 |
| Dickdarm | 33 | 22 | 8 | 2 | 1 |
| Haut | 1000 | 989 | 8 | 2 | 1 |
| Leber | 10000 | 9989 | 8 | 2 | 1 |

^o hier werden alle Blutzellen gebildet

Tabelle 5
Ungefähre Dauer der einzelnen Phasen des Zellzyklus bei einigen repräsentativen Zelltypen im menschlichen Körper

1.2 Regelung des Zellzyklus

Vielzellige Organismen können nur existieren, wenn die Zellzyklen nicht beliebig ablaufen, sondern einer Kontrolle unterliegen. Dies hat zur Folge, dass die Vermehrung der einzelnen Zelle eingeschränkt ist und nur bei Bedarf aktiviert wird (vgl. *Kapitel Krebs, in mentor Abiturhilfe Genetik*). In Zellkultur-experimenten wurden Faktoren ermittelt, die den Zellteilungsmechanismus beeinflussen:

- **Wachstumsfaktoren und Nährstoffe.** Fehlen der Zelle wichtige Nährstoffe, findet keine Zellteilung statt. Sind die Zellen optimal mit Nährstoffen versorgt, teilen sich die Zellen trotzdem nur, wenn zusätzlich ein als Wachstumsfaktor bezeichneter Regulatorstoff vorhanden ist. Solche Wachstumsfaktoren werden u.a. von Blutplättchen freigesetzt, die sich in der Nähe

einer Wunde befinden. Dadurch werden Zellteilungen bei denjenigen Zellen ausgelöst, die zum Wundverschluss dienen.

- **Zelldichte.** Eine zu hohe Zelldichte wirkt sich hemmend auf weitere Zellteilungen aus. Dies bedingt, dass in Geweben die Anzahl der Zellen annähernd gleich bleibt. Die Abnahme der Zelldichte regt umgekehrt die Zellteilung an. So hat starker Blutverlust zur Folge, dass die Blutzellen verstärkt neu gebildet und teilweise sogar in „unreifem“ Zustand in die Blutbahn abgegeben werden. Um Aussagen zur Steuerung des Zellzyklus zu erhalten, benutzt man häufig **Fusionsexperimente**: Dabei werden Zellen durch geeignete chemische Stoffe dazu gebracht, miteinander zu verschmelzen.

Experiment

E01 Nachweis des S-Phase-Aktivators

Werden zwei Zellen, bei denen sich die eine in der S-Phase und die andere in der G_1 -Phase befindet, dazu gebracht zu fusionieren, beginnt der Zellkern der ursprünglichen G_1 -Phasenzelle unverzüglich mit der DNA-Synthese; das Erbgut wird verdoppelt.

Hieraus lässt sich schließen, dass die S-Zelle wahrscheinlich über einen Stoff, ein Signal, verfügt, das den G_1 -Zellkern dazu veranlasst, seinen Syntheseparat in Gang zu setzen. Das Auftreten eines solchen Signals, des so genannten S-Phase-Aktivators, bedingt für eine G_1 -Zelle den Übergang in die S-Phase.

Weitere Experimente verdeutlichen, dass nach erfolgter Replikation dieser Aktivator wieder verschwindet. Die Zelle befindet sich dann in der G_2 -Phase.

Mit dem oben beschriebenen Experiment ist geklärt, wie die S-Phase in Gang gesetzt wird. Mit ähnlichen Fusionsexperimenten hat man festgestellt, dass bei den Übergängen von einer Phase zur nächsten eine Art „Qualitätsprüfung“ stattfindet. Die einzelnen **Kontrollpunkte** können nur dann passiert werden, wenn der vorausgegangene Arbeitsschritt korrekt und vollständig durch-

geführt wurde. Als Signale für diese Übergänge dienen – wie im obigen Experiment gezeigt – molekulare Schalter, spezielle Enzyme, die in den Zellen in inaktiver Form vorliegen und durch Regulatorstoffe aktiviert werden, die in der vorausgehenden Zyklusphase entstehen. Erst dann wird die nächste Zyklusphase in Gang gesetzt. Mit Hilfe der Kontrollpunkte ist sichergestellt,

Die Dynamik der Zelle

dass die einzelnen Phasen in der festgelegten Reihenfolge ablaufen.

Den so genannten **S-Phase-Aktivator** haben wir schon kennen gelernt. Ein weiterer Schalter liegt am Ende der G_2 -Phase. Während der M-Phase konnte ein hochwirksamer **M-Phasen-Förderfaktor** (MPF = M-phase-promoting factor) im Cytoplasma festgestellt werden. Ist er vorhanden, wird

das Erbgut augenblicklich kondensiert. Es entstehen die einzelnen Chromosomen und die Zellteilung wird vorbereitet, unabhängig davon, ob bereits eine Verdopplung stattgefunden hat, also in welchem Stadium des Zellzyklus der Zellkern ist. Für eine korrekte Zellteilung ist der koordinierte Ablauf allerdings unbedingt notwendig.

Aufgabe

B03

Erstellen Sie mit Hilfe der obigen Textangaben und von Abbildung 28 ein Schema, welches das Zusammenwirken der Faktoren, die den Zellzyklus steuern und regeln, verdeutlicht!

1.3 Zellalterung

Normale Körperzellen bei höher entwickelten Organismen wie Vögeln und Säugern setzen ihre Vermehrung nicht unbegrenzt fort. Für menschliche Embryonalzellen hat man ca. 50 Zellzyklen als normal ermittelt. Dabei verlaufen die Zellzyklen zum Ende hin immer langsamer und kommen schließlich zum Stillstand. Nach einer entsprechenden „Arbeitsphase“ sterben die Zellen dann ab.

Entnimmt man menschliche Bindegewebszellen aus einem Embryo, so durchlaufen diese Zellen in Zellkulturen ca. 60 Zellzyklen, bei Bindegewebszellen eines 40-jährigen hören die Teilungen nach durchschnittlich

40 Verdopplungen auf, diejenigen eines 80-jährigen teilen sich nur noch rund 30-mal. Dieses Phänomen wird als Zellalterung bezeichnet.

Bei Tumorzellen sind die Regulationsmechanismen für die Zellteilungen außer Kraft gesetzt. Tumorzellen reagieren nicht mehr auf die entsprechenden Signale, die normalerweise die Zellteilungen unterbinden, in Zellkulturen teilen sie sich deshalb unbegrenzt weiter. Tumorzellen sind dadurch potenziell „unsterblich“ (vgl. *Kapitel Krebs in der mentor Abiturhilfe Genetik*).

2. Die Mechanik der Zellteilung – Mitose

Während der M-Phase des Zellzyklus werden die in der S-Phase verdoppelten genetischen Informationen auf zwei Tochterzellen aufgeteilt. Der Vorgang der Verdopplung selbst ist

nicht sichtbar. Lichtmikroskopisch ist ein ungeordnetes, gleichmäßig verteiltes fädiges Gewirr, das so genannte **Chromatingerüst**, zu erkennen.

Seite 27 **A05**

1 = Zellwand; 2 = Zellkern (Nukleus); 3 = Kernhülle; 4 = Kernkörperchen (Nukleolus); 5 = Kernpore; 6 = Centriolenpaar; 7 = Plastid (Chloroplast); 8 = Mitochondrium; 9 = Tonoplast; 10 = Ribosom; 11 = Vakuole; 12 = glattes ER; 13 = raues ER; 14 = Dictyosom; 15 = GOLGI-Vesikel; 16 = Zellmembran

Seite 30 **A06**

Die Flächenanteile sind:

| Abbildung | Mitochondrien | raues ER |
|---------------------------------------|---------------|-----------|
| β-Zelle der Bauchspeicheldrüse | ca. 5,4 % | ca. 38 % |
| Belegzelle der Magenwand | ca. 31 % | ca. 2,7 % |

Auffallend ist die Häufung von rauem ER in der β-Zelle der Bauchspeicheldrüse, dagegen von Mitochondrien in der Belegzelle der Magenwand. Außerdem ist die Oberfläche der Zellmembran der Belegzelle zur Magenseite hin durch zwei große Einstülpungen und viele kleine Ausstülpungen stark vergrößert.

Nimmt man die Informationen über die Aufgaben der Zellorganellen aus Kapitel A. 3. 2. zu Hilfe, so lassen sich die Funktionen der beiden Zelltypen etwa folgendermaßen formulieren:

- Mitochondrien kommen häufig in Zellen mit stoffwechselaktiven Aufgaben vor; Energiebereitstellung.
- Raues ER mit vielen Ribosomen kommt gehäuft in Zellen mit sekretorischen Aufgaben vor; Proteinbiosynthese.
- Die Oberflächenvergrößerung der Zellmembran deutet auf intensiven Stoffaustausch hin.

Seite 35 **A07**

| Eucyte | Protocyte |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kernmembran, „echter“ Zellkern • deutlich größer • deutliche Strukturierung mittels einer Vielzahl spezifischer Zellorganellen und Membranen | <ul style="list-style-type: none"> • keine Kernmembran, ringförmiger DNA-Strang, als „Kernäquivalent“ • deutlich kleiner, etwa so groß wie die Mitochondrien der Eucyten • Strukturierung weniger komplex, außer Membranstrukturen und Ribosomen keine speziellen Zellorganellen |