

Inhaltsverzeichnis

DIE ZELLE.....	2
<i>Der Mensch als Vielzeller.....</i>	<i>2</i>
<i>Gewebe</i>	<i>2</i>
<i>Gestalt der Zellen</i>	<i>2</i>
<i>Gemeinsamkeiten aller Zellen</i>	<i>3</i>
<i>Zytosol</i>	<i>3</i>
DIE ZELLMEMBRAN	3
<i>Rezeptorfunktion</i>	<i>4</i>
<i>Selektive Permeabilität</i>	<i>4</i>
DIE ZELLORGANELLEN	5
<i>Der Zellkern.....</i>	<i>5</i>
<i>Die Ribosomen.....</i>	<i>6</i>
<i>Das endoplasmatische Retikulum</i>	<i>6</i>
<i>Der Golgi-Apparat.....</i>	<i>7</i>
<i>Lysosomen und Peroxysomen</i>	<i>7</i>
<i>Die Mitochondrien.....</i>	<i>7</i>
<i>Zytoskelett und Zentriolen</i>	<i>8</i>
<i>Zelleinschlüsse</i>	<i>8</i>
DIE „WASSERBASIS“ DES ORGANISMUS.....	8
STOFFTRANSPORT	9
<i>Stoffaustausch zwischen Kapillaren und Interstitium.....</i>	<i>9</i>
<i>Stoffaustausch zwischen Interstitium und Lymphkapillaren..</i>	<i>9</i>
<i>Stoffaustausch zwischen Interstitium und Zelle</i>	<i>10</i>
<i>Passive Transportprozesse - Diffusion</i>	<i>10</i>
<i>Passive Transportprozesse - Osmose</i>	<i>11</i>
<i>Die Osmolarität</i>	<i>11</i>
<i>Der koloidosmotische Druck</i>	<i>12</i>
<i>Passive Transportprozesse - Filtration.....</i>	<i>12</i>
<i>Aktiver Transport.....</i>	<i>13</i>
<i>Der Bläschentransport.....</i>	<i>13</i>
DIE PROTEINSYNTHESE.....	14
<i>Der genetische Code.....</i>	<i>14</i>
<i>Die Transkription.....</i>	<i>14</i>
<i>Die Translation.....</i>	<i>15</i>
<i>Abschluß der Proteinbiosynthese.....</i>	<i>15</i>
<i>Der Genbegriff.....</i>	<i>15</i>
DIE TEILUNG VON ZELLEN.....	15
DIE MITOSE	16
<i>Die DNA-Replikation.....</i>	<i>16</i>
<i>Die Phasen der mitotischen Zellteilung.....</i>	<i>16</i>
<i>Die Teilung des Zelleibs</i>	<i>17</i>
DIE PHASEN DES ZELLZYKLUS.....	17
DIE MEIOSE	18

Die Zelle

Zellen sind die kleinsten Bau- und Funktionseinheiten des Organismus. Sie können Stoffe aufnehmen, umbauen und auch wieder freisetzen, also am Stoffwechsel teilnehmen. Außerdem können viele Zellen wachsen, sich teilen und auf Reize aus ihrer Umgebung reagieren.

Der Mensch als Vielzeller

Große Organismen, wie insbesondere der Mensch, bestehen nicht etwa aus besonders großen, sondern aus ungeheuer vielen Zellen. Dementsprechend sind größere Lebewesen nicht „Großzeller“, sondern „Vielzeller“. Der Körper eines erwachsenen Menschen ist aus etwa 10^{13} (10 000 Milliarden) Zellen zusammengesetzt. Pro Sekunde werden mehrere Millionen Zellen neu gebildet, und ebenso viele gehen zugrunde.

Gewebe

Für die verschiedenartigen Aufgaben, die in einem großen Organismus zu erledigen sind, haben sich die Zellen im Dienste des Gesamtorganismus spezialisiert. Man bezeichnet dies als **funktionelle Differenzierung**. Zellen, die mit derselben Arbeit betraut sind, bilden üblicherweise Zellverbände, die **Gewebe**. So bestehen beispielsweise Drüsen aus einer Vielzahl von Zellen, die auf die Bildung von bestimmten Sekreten (wie z.B. Schleim oder Muttermilch) spezialisiert sind. Muskelzellen dagegen können sich verkürzen, wodurch der Gesamtorganismus in die Lage versetzt wird, sich fortzubewegen.

S. 30

Gestalt der Zellen

Aus der funktionellen Differenzierung folgt die unterschiedliche Form, Gestalt und Größe der Zellen des Körpers. Während eine Nervenzelle vielfach verzweigt ist, sind andere Zellen ellipsen- oder kugelförmig. Die reife Eizelle, mit einem Durchmesser von etwa 0,15 mm (150 µm) die größte menschliche Zelle, sieht man mit bloßem Auge. Zum Erkennen aller übrigen Zellen ist ein Mikroskop erforderlich - sie sind nur zwischen 7 und 30 µm groß. Trotzdem sind alle Zellen eines Menschen aus einer einzigen befruchteten Eizelle hervorgegangen und besitzen alle den gleichen genetischen Bauplan aus der Erbsubstanz DNA.

3 A

Gemeinsamkeiten aller Zellen

Trotz der erwähnten Formenvielfalt gibt es grundlegende Gemeinsamkeiten bei allen Zellen. Mit einfachen Lichtmikroskopen erkannte man schon sehr früh, daß die Zelle aus mindestens zwei Komponenten zusammengesetzt sein mußte: zum einen aus dem Zelleib mit der darin enthaltenen Grundsubstanz, dem **Zytoplasma**, zum anderen aus dem Zellkern **Nukleus**. Mit verbesserter Mikroskopiertechnik kamen dann, im Vergleich zum Zellkern, noch wesentlich kleinere Zellorgane zum Vorschein, die **Zellorganellen**. Der Feinbau dieser Organellen konnte jedoch erst mit Hilfe des Elektronenmikroskops näher betrachtet werden.

Die meisten Lebensvorgänge innerhalb der Zelle, die in Form von chemischen Reaktionen ablaufen, können aber selbst mit dem Elektronenmikroskop nicht direkt sichtbar gemacht werden.

Zytosol

Die Zellorganellen nehmen etwa 50 % des gesamten Zellvolumens ein. Der verbleibende Rest des Zytoplasmas wird als **Zytosol** bezeichnet. Im Zytosol spielen sich die meisten Stoffwechselprozesse als komplexes Zusammenspiel chemischer Reaktionen ab. Das Zytosol besteht zu 70 - 95 % aus Wasser. Den Rest bilden die darin gelösten Moleküle, die die Zelle benötigt, vor allem Proteine, Fette, Kohlenhydrate und Ionen. Aufgrund des hohen Eiweißgehalts ist das Zytosol äußerst zähflüssig.

S. 31 O.

Die Zellmembran

Jede Zelle ist von einer hauchdünnen, etwa ein Hunderttausendstel Millimeter (0,01µm) dicken Membran umschlossen, die als **Zellmembran**, **Zytoplasmamembran**, oder **Plasmalemm** bezeichnet wird. Die Zellmembran gibt der Zelle eine flexible Hülle, schützt ihren Inhalt und grenzt ihn von der Umgebung ab.

Unter dem Elektronenmikroskop erkennt man, daß diese Zellmembran aus drei Schichten aufgebaut ist:

- einer hellen und breiten mittleren Schicht sowie
- zwei schmalen, dunkleren Schichten, welche die Innen- und die Außenseite der Membran bilden.

Chemisch gesehen besteht die Zellmembran aus einem weitgehend flüssigen Doppelfilm fettähnlicher Substanzen, deren Bausteine **Phospholipid-Moleküle** sind. Ein einzelnes Phospholipidmolekül besitzt jeweils zwei lange, wasserabstoßende (*hydrophobe*) Schwänze sowie einen wasseranziehenden (*hydrophilen*) Kopf. Jeweils zwei Phospholipidmoleküle stehen sich gegenüber und bilden so die Phospholipid-Doppelschicht.

Die wasseranziehenden Kopfteile begrenzen als dunkle Schichten die Membran nach außen und nach innen, während die sich gegenüberstehenden Schwänze die dickere und hellere Mittelschicht der Membran bilden.

Neben der Phospholipid-Doppelschicht, die gewissermaßen das Gerüst der Membran darstellt, bilden eingelagerte Proteine die zweite wichtige Komponente der Zellmembran. Manche dieser Proteine sind nur in die Phospholipidschicht eingelagert, andere durchdringen sie vollständig. Diese, die Membran vollständig durchdringenden Proteine, sogenannte **Tunnelproteine**, enthalten Kanäle, die Innen- und Außenseite der Membran miteinander verbinden. In der Regel liegen Tunnelproteine zweier benachbarter Zellen einander an und bilden so eine Verbindung zwischen den Zytoplasmarräumen der beiden benachbarten Zellen. Ein feiner bleibender Spalt verbindet sie auch mit dem Interstitium.

In geringerem Umfang enthält die Membran noch eine weitere Fettform, das Cholesterin. Daneben ragen aus der Membranaußenseite noch antennenförmig Strukturen hervor, die aus Glykoproteinen und Glykolipiden, also Kombinationen aus Kohlenhydraten und Proteinen bzw. Fetten, bestehen. Diese großen Moleküle dienen zum Teil als Rezeptoren und empfangen z.B. Hormonsignale.

Da auch innerhalb der Zelle zahlreiche Membranen vorkommen, die ganz ähnlich aufgebaut sind wie die die Zelle umgebende Zellmembran, bezeichnet man diesen Membrantyp auch als **Einheitsmembran**.

Rezeptorfunktion

Einige der Membranproteine und Oligosaccharide in der Zellmembran fungieren als Rezeptoren. Rezeptoren können verschiedene Baustoffe wie beispielsweise Hormone oder Neurotransmitter erkennen. Andere erkennen, ob es sich bei der Nachbarzelle um eine Zelle mit gleicher Funktion handelt. Dies ist bei Wachstumsprozessen wichtig, da benachbarte Zellen oft ihr Wachstum einstellen, sobald sie sich gegenseitig berühren. Wenn dieses wachstumshemmende Berührungssignal fehlt, kann es unter Umständen zur Ausbildung von Tumoren kommen.

Selektive Permeabilität

Die Zellmembran reguliert den Durchtritt von Stoffen d.h., sie ist letztlich dafür verantwortlich, welche Stoffe in die Zelle einströmen bzw. welche sie verlassen. Diese Eigenschaft bezeichnet man **selektive Permeabilität** oder **Semipermeabilität**.

Die Durchlässigkeit hängt im Wesentlichen von vier Faktoren ab:

1. **Molekülgröße:** Sehr kleine Moleküle, wie z.B. Wasser oder gelöste Gase wie Sauerstoff und Kohlendioxyd, können die Zellmembran ungehindert überwinden, während sie für große Moleküle wie Eiweiße ein unüberwindbares Hindernis sind.
2. **Fettlöslichkeit:** Den weitaus größten Anteil der Zellmembran macht die fettlösliche mittlere Schicht aus. Je fettlöslicher ein Stoff ist, um so besser kann er diese Schicht überwinden. Z.B. auf Steroidhormone trifft dies zu.
3. **Elektrische Ladung der Substanz:** Elektrisch geladene Teilchen (*Ionen*) können die Phospholipid-Doppelschicht kaum überwinden. Für den Transport durch die Membran sind sie auf das Vorhandensein der bereits erwähnten Tunnelproteine angewiesen, wobei sie für einen schnellen Transport außerdem noch elektrisch entgegengesetzt zu dem Tunnelprotein geladen sein müssen.
4. **Carriermoleküle:** Dies sind Trägermoleküle (*carrier = Träger*), durch die eine Substanz fettlöslich gemacht wird, so daß sie die Phospholipidschicht überwinden kann.

Über diesen Mechanismus gelangt z.B. Glukose in die Zellen. Das Carriermolekül verbindet sich an der Außenseite der Membran mit der Glukose, durchdringt in dieser Form die Phospholipidschicht und setzt an der Innenseite der Membran die Glukose wieder frei.

Die selektive Permeabilität der Zellmembran ist die Voraussetzung, um die für viele Stoffe unbedingt notwendigen Konzentrationsunterschiede zwischen dem Zellinneren und der äußeren Umgebung aufrechtzuerhalten.

Die Zellorganellen

Da zahlreiche chemische Reaktionen in der Zelle zur gleichen Zeit ablaufen, muß sichergestellt sein, daß diese nicht miteinander in Konflikt geraten. Deshalb ist die Zelle in ein System von getrennten Räumen unterteilt, die von den Zellorganellen, also sozusagen den **Organen der Zelle**, gebildet werden. Sowohl die Gesamtzahl als auch die Typen der Organellen unterscheiden sich von Zelle zu Zelle entsprechend ihrer Funktion oft erheblich.

S. 32 O.L.

Der Zellkern

Der Zellkern ist die größte Struktur innerhalb der Zelle und bereits mit einem einfachen Lichtmikroskop erkennbar. Die meisten Körperzellen besitzen nur einen einzigen Kern, in manchen Zellen, z.B. Skelettmuskelzellen, kommen aber auch mehrere Kerne vor. Andererseits gibt es einen Typ von Zellen, die ihren Zellkern im Laufe ihrer Reifung verloren haben: die reifen roten Blutkörperchen.

Der Zellkern übt seine Hauptfunktionen zusammen mit dem Zytoplasma aus: Er ist das Steuerungszentrum des Zellstoffwechsels und beherbergt die genetische Information.

In der Zeit, in der der Kern sich nicht teilt, hat er ein typisches Aussehen: Er ist von zwei Membranen umgeben, die ähnlich aufgebaut sind wie die Zellmembran und deren innere die Kernmembran darstellt. Beide Membranen zusammen bilden die **Kernhülle**. Diese ist von den **Kernporen** durchsetzt. Im Randbereich dieser Poren sind die beiden Membranen miteinander verbunden.

S. 32 M.

Alle Bestandteile des Kerninnenraums werden zusammen als **Karyoplasma**, bezeichnet. Es besteht aus:

- Erbsubstanz in Form der DNA, die in 46 Untereinheiten, den Chromosomen, gruppiert vorliegt. Die Gesamtheit aller Chromosomen im Karyoplasma, bezeichnet man auch als **Chromatin**.
- Einem oder mehreren **Nukleoli** oder **Kernkörperchen**. Die Nukleoli sind der Ort, an dem im Zellkern RNA gebildet wird.
- Der **Karyolymphe** (Kernsaft) mit den Kerneinschlüssen wie z.B. Glykogen oder Lipide.

3 B O.

- Der Chromosomensatz des Menschen

Die **46 Chromosomen** der menschlichen Körperzellen bestehen aus 23 Chromosomen-Paaren, von denen jeweils ein Set aus 23 Chromosomen von der Mutter und das andere

Set vom Vater stammt. Jedes Chromosom liegt somit in doppelter Ausführung vor, weshalb man auch vom **diploiden Chromosomensatz** spricht. Durch den Einsatz bestimmter Färbetechniken kann jedes einzelne Chromosom durch seine charakteristischen Bandenmuster genau gekennzeichnet werden (s. Folie oberes Bild). Solch eine Kartierung von Chromosomen wird **Karyogramm** genannt.

Die Chromosomenpaare gleichen sich bei Männern allerdings nicht völlig: Nur 22 der 23 Chromosomenpaare bestehen jeweils aus nach Form, Größe und Bandenmuster identischen Paaren. Diese 22 Paare bezeichnet man als **Autosomen**. Das verbleibende Chromosomenpaar sind die **Gonosomen** oder **Geschlechtschromosomen**. Das Geschlechtschromosomenpaar ist bei Mann und Frau unterschiedlich: Männer haben ein X- und ein wesentlich kleineres Y-Chromosom, Frauen dagegen zwei X-Chromosomen

3 B R.O+U

- Die Chromosomen

Bei der ruhenden, sich nicht teilenden Zelle liegen die 46 Chromosomen wie lose, vielfach gewundene Fäden im Zellkern. Diese Fäden sind so dünn, daß sie im Lichtmikroskop nicht sichtbar sind. Sie bestehen aus der Erbsubstanz DNA, die von einer schützenden Proteinhülle umgeben ist. Diese Proteinhüllen bilden das sogenannte Kerngerüst, das durch Anfärben sichtbar gemacht werden kann (Chromatingerüst).

S.32 R.

Nur während der Kernteilung, die der Zellteilung vorausgeht, sind die Chromosomen im Mikroskop sichtbar, weil sich dann die 46 langen Fäden zu 46 kompakten Strukturen aufwickeln (vergleichbar mit Wollfäden, die zu Wollknäueln aufgewickelt werden). Die jetzt sichtbaren Chromosomen sind hakenförmige Gebilde mit einer Einschnürung, dem **Zentromer** (Abb.). Das Zentromer gliedert das Chromosom in zwei meist unterschiedlich lange Chromosomenschenkel.

- Verdoppelung der Chromosomen

Vor jeder Kernteilung werden die beiden Chromosomenschenkel verdoppelt, wodurch zwei identische Untereinheiten entstehen, die **Chromatiden**. Die beiden Chromatiden sind zunächst noch am Zentromer miteinander verbunden. Im Laufe der Kernteilung ziehen jedoch die Mikrotubuli, spezielle Organellen für die Kernteilung, die beiden Chromatiden am Zentromer auseinander.

S.33 L.U.

Die Ribosomen

Ribosomen finden sich in großer Zahl in jeder Zelle und sind auch bei Betrachtung mit dem Elektronenmikroskop wegen ihrer Winzigkeit nur als Körnchen sichtbar. Man weiß, daß sie aus zwei verschiedenen großen Untereinheiten zusammengesetzt sind und hauptsächlich aus Proteinen und ribosomaler RNA bestehen. Ribosomen sind die Zellorganellen für die **Proteinbiosynthese**, die noch ausführlich erläutert wird.

Das endoplasmatische Retikulum

Das Zytoplasma der meisten Zellen enthält ein reich verzweigtes membranumschlossenes Hohlraumsystem, das endoplasmatische Retikulum. Die Membranen dieses Systems, die wiederum ähnlich aufgebaut sind wie die Zellmembranen, bilden eine Art Kanalsystem

durch die Zelle, dessen hauptsächlicher Sinn darin besteht, den Stoff- und Flüssigkeitstransport in der Zelle zu lenken.

S.33 R.U.

Der Golgi-Apparat

Typischerweise in Kernnähe findet man ein System aus napfförmigen Membransäckchen, die in Stapeln von fünf bis zehn dicht gepackt aufeinanderliegen. Ein einzelner Stapel wird als **Diktyosom** bezeichnet, die Gesamtheit aller Diktyosomen einer Zelle ist der Golgi-Apparat.

Vom Rand und der Innenseite der Diktyosomen schnüren sich substanzgefüllte Bläschen ab, die **Golgi-Vesikel**.

Im Golgi-Apparat werden auszuscheidende Stoffe, die sie vom endoplasmatischen Retikulum erhalten, portionsweise abgeschnürt und über den Exozytosemechanismus aus der Zelle ausgeschleust. Der Golgi-Apparat hat also hauptsächlich sekretorische Funktion und ist deshalb besonders ausgeprägt in Zellen, die sich auf die Bildung von Hormonen oder Sekreten spezialisiert haben. Ferner ist der Golgi-Apparat an der Bildung der Lysosomen beteiligt.

Lysosomen und Peroxysomen

Lysosomen sind winzige, von einer Membran umschlossene Bläschen, die vom Golgi-Apparat gebildet werden. Ihre Hauptfunktion besteht darin, die durch Phagozytose aufgenommenen Fremdstoffe mittels der in ihnen gespeicherten Enzyme zu verdauen. Aber auch nicht mehr funktionsfähige, zelleigene Organellen können mit Hilfe der lysosomalen Enzyme abgebaut und die Abbauprodukte dem Zytoplasma wieder zur Verfügung gestellt werden, sozusagen eine Art intrazelluläres Recycling.

Äußerlich kaum von den Lysosomen zu unterscheiden sind die maximal 0,5 µm großen, ebenfalls membranumgebenen **Peroxisomen**. Sie besitzen andere Enzyme als die Lysosomen und dienen wahrscheinlich der Entgiftung von im Zellstoffwechsel entstehenden Metaboliten.

S. 34 U.L., DANN O.R.

Die Mitochondrien

Jede lebende Zelle benötigt für ihren Stoffwechsel sowie die aktiven Membrantransportprozesse Energie. Diese wird in den Mitochondrien erzeugt, weshalb man sie auch als Kraftwerke der Zelle bezeichnet.

Mitochondrien besitzen eine charakteristische schmale Eiform und sind aus einer inneren und äußeren Membran aufgebaut. Zur Oberflächenvergrößerung bildet die innere Membran zahlreiche Auffaltungen, die als **Cristae** bezeichnet werden.

In den Reaktionsräumen des Mitochondriums findet eine komplizierte Kette von Reaktionen statt, wobei unter Verbrauch von Sauerstoff vorwiegend Glukose und Ketonkörper verbrannt werden. Die dabei entstehende Energie wird zur Regeneration des „Akkus“ ATP verwendet; das ATP steht dann wieder für energieverbrauchende Vorgänge zur Verfügung, z.B. für das Zusammenziehen einer Muskelfaser.

Die Zahl der Mitochondrien spiegelt den Energiebedarf einer Zelle wieder. Herzmuskelzellen beispielsweise weisen eine hohe Mitochondriendichte auf, ebenso die durchtrainierten Skelettmuskeln eines Sportlers.

Dagegen kommen wenig stoffwechselaktive Zellen, wie z.B. Knorpelzellen, mit nur wenigen Mitochondrien aus.

S. 34 R.U.

Zytoskelett und Zentriolen

Das Zytoplasma besitzt innere, stabilisierende Strukturen, die in ihrer Gesamtheit als **Zytoskelett** (*Zellskelett*) bezeichnet werden. Zu diesem Zytoskelett tragen insbesondere Mikrotubuli und Mikrofilamente bei.

Mikrofilamente sind lange, fadenförmige Gebilde und bestehen aus den Proteinen *Aktin* und *Myosin*. Sie lagern sich meist zu Bündeln zusammen. Solche Filamentbündel nennt man dann Fibrillen. Bei Muskelzellen sind die Myofibrillen die Strukturen, die die Muskelzelle zur Kontraktion befähigen.

Mikrotubuli sind verschieden lange, über das ganze Zytoplasma verstreut liegende, röhrenförmige Gebilde, die aus dem Protein *Tubulin* aufgebaut sind. Manche dieser Mikrotubuli sind stationär, das heißt sie bilden in der Zelle ein dauerndes Gerüst, das wesentlich zur Erhaltung der Zellform beiträgt. Andere Mikrotubuli werden nur während der Zellteilung aufgebaut. Diese heißen Mitosespindeln. Sie trennen im Teilungsprozeß die beiden Chromatiden voneinander.

Einige Arzneimittel blockieren diesen Aufbau der Mikrotubuli. Dadurch kann sich die Zelle nicht mehr teilen. In der Tumortherapie versucht man, durch Einsatz solcher Zytostatika (z.B. Vincristin[®], Vinblastin[®]) die Vermehrung der Tumorzellen zu stoppen.

Die **Zentriolen** (*Zentralkörperchen*) sind winzige L-förmige Gebilde, die als Zentriolenpaar typischerweise in Kernnähe gelegen sind. Jedes Zentriol ist aus neun parallel angeordneten Mikrotubuli aufgebaut. Zentriolen spielen eine wichtige Rolle während der Zellteilung, da sie die Mikrotubuli des Spindelapparates ausbilden.

Zelleinschlüsse

Zelleinschlüsse sind Ansammlungen von Substanzen, die in der Regel von der Zelle selbst produziert wurden und teilweise an ihrer Form (meist Körnchenform) oder einer typischen Farbe als Einschlüsse im Karyo- oder Zytoplasma zu erkennen sind. So wird beispielsweise das die Hautbräune verleihende Pigment Melanin von bestimmten Zellen der Haut gebildet.

Zu den Zelleinschlüssen gehören auch Glykogen-Tröpfchen, die Speicherform der Glukose. Sie sind hauptsächlich in den Zellen von Leber- und Skelettmuskeln anzutreffen, und im Bedarfsfall kann das Glykogen rasch abgebaut und zur Energieerzeugung herangezogen werden. Auch Fetttöpfchen bilden Zelleinschlüsse, insbesondere in den Zellen des Fettgewebes, aber auch in Leberzellen.

S.35

Die „Wasserbasis“ des Organismus

Es ist eine Tatsache, daß der Mensch überwiegend aus Wasser besteht. Beim Neugeborenen entfallen etwa 75 % des Körpergewichts auf das Wasser, bei Erwachsenen etwa 60%. Mit zunehmendem Alter nimmt also der Wassergehalt des Körpers ab. Bei Frauen ist der Wassergehalt im Vergleich zu Männern geringer, weil das relativ wasserarme Fettgewebe bei Frauen stärker ausgebildet ist.

Bezogen auf einen erwachsenen Menschen mit etwa 70 kg Körpergewicht befindet sich mit etwa 30 Litern der größte Teil dieses Körperwassers als Hauptbestandteil des Zytosols

in den Zellen. Es wird deshalb als **intrazelluläre Flüssigkeit** bezeichnet. Ihr gegenüber steht die **extrazelluläre Flüssigkeit**, die sich außerhalb der Zellen in folgenden drei Räumen befindetet:

1. Dem **Plasmaraum** oder **Intravasalraum**: In den Blutgefäßen finden sich etwa 4 Liter Blutplasma, die flüssige Komponente des Blutes.
2. Dem **Interstitium**. Es besteht aus etwa 10 Litern Flüssigkeit, die alle Körperzellen wie ein dreidimensionales Kanalnetz umgibt. Jeder Stoff, der entweder zur Zelle gelangen soll oder von der Zelle abgegeben wird, kann dies grundsätzlich nur über die interstitielle Flüssigkeit tun. Zur interstitiellen Flüssigkeit zählt auch die aus dem Interstitium in die Lymphkapillaren abgepreßte Lymphe.
3. Zu den **transzellulären Flüssigkeiten** rechnet man z.B. den Liquor cerebrospinalis, die Flüssigkeit in den Körperhöhlen, das Kammerwasser des Auges oder die Synovialflüssigkeit der Gelenke. Insgesamt verfügt der Körper über etwa 1 Liter transzellulärer Flüssigkeit.

2 - 3 Liter Wasser nimmt der Mensch täglich zu sich, in heißer Umgebung oder als Marathonläufer auch 10 Liter und mehr. Während der Mensch einige Monate ohne feste Nahrung überleben kann, stirbt er bei Wasserentzug bereits nach wenigen Tagen. Säuglinge und Kleinkinder benötigen vergleichsweise mehr Wasser als Erwachsene, weil sie das Wasser durch das ungünstigere Oberflächen-Volumenverhältnis über Haut und Lungen schneller wieder abgeben.

Stofftransport

Jede Funktion der Zelle, egal ob Reproduktion, Wachstum, Regeneration, Kontraktion oder Erregbarkeit, erfordert einen Transport bzw. Austausch von Stoffen innerhalb des Organismus. So müssen beispielsweise ständig Sauerstoff und Nährstoffe an jede einzelne Zelle herangeführt werden; andererseits muß gewährleistet sein, daß Stoffwechselprodukte der Zelle, wie z.B. das ständig anfallende Kohlendioxid (CO₂), aus der Zelle abtransportiert werden.

S.36 O.L.

Stoffaustausch zwischen Kapillaren und Interstitium

Die Grenze zwischen dem Blutplasma und dem interstitiellen Raum stellt die riesige Austauschfläche der kleinsten Blutgefäße, der Kapillaren, dar. Man darf sich die Grenze zwischen Kapillaren und Interstitium nicht als „eisernen Vorhang“ vorstellen, sondern es findet ein reger Flüssigkeitsaustausch statt.

Durch die Kapillarwände werden Wasser und kleine Moleküle aus dem Blut ins Gewebe abgepreßt. Zellen und größere Proteine bleiben in der Regel im Plasma zurück, weil sie die Wände der Kapillaren nicht durchdringen können.

Stoffaustausch zwischen Interstitium und Lymphkapillaren

Die interstitielle Flüssigkeit steht nicht nur mit den Blutkapillaren, sondern zusätzlich mit Lymphkapillaren in Verbindung. Diese Lymphkapillaren vereinigen sich zu größeren Lymphgefäßen und erreichen als erste Station kleine Lymphknoten, die in praktisch jedem Winkel des Organismus zu finden sind. Stoffe, die aus dem Kapillargebiet in die Lymphe abdrainiert werden, kommen in den Lymphknoten mit dem körpereigenen Immunsystem in Kontakt.

Stoffaustausch zwischen Interstitium und Zelle

Wie erwähnt stellen Zellmembranen Hindernisse für den Teilchentransport dar; sie sind für die meisten Stoffe nur begrenzt durchlässig (*permeabel*). Bei den durch diese semipermeablen (*selektiv permeablen*) Membranen stattfindenden Prozessen unterscheidet man grundsätzlich zwischen

- **passiven Prozessen**, bei denen der Transport durch die Membran ohne den Verbrauch von Energie bewerkstelligt wird und
- **aktiven Transportprozessen**, die nur unter Zufuhr von Energie durch die Zelle stattfinden können.

Passive Transportvorgänge sind die **Diffusion**, die **Osmose** und die **Filtration**.

S. 36 O.R.

Passive Transportprozesse - Diffusion

Alle Teilchen (Moleküle, Ionen) im Flüssigkeitsraum eines Organismus sind aufgrund der ihnen innewohnenden kinetischen Energie in ständiger Bewegung - diese bezeichnet man auch als **Brownsche Molekularbewegung**. Die Zahl der zufälligen Zusammenstöße von Teilchen ist abhängig von der Konzentration:

An einem Ort hoher Konzentration finden viele Teilchenzusammenstöße statt, an einem Ort niedriger Konzentration entsprechend weniger.

Als Folge der ständigen Bewegung durchmischt sich ein Flüssigkeitsraum ständig: die gelösten Teilchen wandern immer in größerer Zahl vom Ort höherer Konzentration zum Ort niedriger Konzentration als umgekehrt. Als Effekt findet also ein gerichteter Teilchentransport entlang des Konzentrationsgefälles statt. Diesen Transportvorgang bezeichnet man als **Diffusion**.

An einem einfachen Beispiel läßt sich der Diffusionsvorgang gut veranschaulichen: Gibt man einen Tropfen Tinte in ein wassergefülltes Glas, so verteilt sich die Tinte so lange, bis im ganzen Gefäß die Konzentration der Tinte gleich groß ist und damit die Flüssigkeit einheitlich blau ist.

Die Geschwindigkeit des Konzentrationsausgleichs (Diffusionsvorgang) hängt u.a. von der Art des Lösungsmittels, der Teilchenform und auch der Temperatur ab. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist zwar, verglichen mit anderen Transportvorgängen, sehr niedrig, trotzdem spielt die an sich langsame Diffusion bei kürzesten Distanzen, wie z.B. zwischen Kapillarwand und Gewebe, eine entscheidende Rolle.

So diffundiert z.B. der Sauerstoff aus den Kapillaren entlang seines Konzentrationsgefälles über das Interstitium in die Zellen, wo er verbraucht wird. Durch den ständigen Verbrauch des Sauerstoffs in der Zelle findet kein Konzentrationsausgleich statt, die treibende Kraft für die Diffusion, also das Konzentrationsgefälle, bleibt erhalten.

Das genau entgegengesetzte Konzentrationsgefälle besteht für das in der Zelle ständig anfallende Kohlendioxid (CO₂): Es diffundiert durch die Zellmembran ins Interstitium und von dort ins Blut, aus dem es durch Abatmung in der Lunge ständig entfernt wird.

Für die Atemgase Sauerstoff und Kohlendioxid stellt die Zellmembran praktisch kein Diffusionshindernis dar.

S. 37 M.

Passive Transportprozesse - Osmose

Unter Osmose versteht man einen Lösungsmitteltransport (im menschlichen Organismus immer mittels Wasser) durch eine **semipermeable** (*halbdurchlässige*) Membran, die zwei Lösungen unterschiedlicher Teilchenkonzentration voneinander trennt.

Osmotische Transportvorgänge finden statt, wenn eine selektiv permeable Membran zwar Lösungsmittelmoleküle ungehindert hindurchtreten läßt, nicht aber die größeren, gelösten Teilchen, die sich beispielsweise in der Abbildung in der rechten Gefäßhälfte befinden. Entsprechend seinem Konzentrationsgefälle diffundiert das Lösungsmittel nun von der linken in die rechte Gefäßhälfte, und zwar so lange, bis die der Diffusion entgegenwirkende Kraft, der Druck der Wassersäule, der hydrostatische Druck, den Vorgang zum Stehen bringt.

Man kann den osmotisch bedingten Lösungsmitteltransport auch als Diffusionsvorgang auffassen, nur daß die Diffusionsbewegung nicht die gelösten Teilchen, sondern das Lösungsmittel betrifft. Dieser Lösungsmitteltransport erfolgt entlang des Konzentrationsgefälles vom Ort höherer Konzentration des Lösungsmittels zum Ort niedrigerer Konzentration des Lösungsmittels.

• Der osmotische Druck

Jetzt ist ein Gleichgewichtszustand erreicht: Der Druck, mit dem das Lösungsmittel ins rechte Becken einströmt, ist nun gleich groß wie der durch den Flüssigkeitseinstrom im rechten Becken erzeugte hydrostatische Druck, der die Lösungsmittelmoleküle ins linke Becken zurückdrängt. Es wandern nun gleichviel Lösungsmittelmoleküle von links nach rechts und von rechts nach links. Einströmende und ausströmende Flüssigkeit halten sich jetzt also die Waage - oder anders ausgedrückt - der Netto-Flüssigkeitsstrom ist nun Null.

Der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule, die im rechten Gefäß vor Erreichen des Gleichgewichtszustands aufgrund des eingeströmten Lösungsmittels entstanden ist, entspricht dem osmotischen Druck.

Seine Größe hängt ab von der Konzentration jener Teilchen, welche die semipermeable Membran nicht passieren können. Eine hohe Teilchenkonzentration erzeugt durch starken Lösungsmiteleinstrom einen hohen osmotischen Druck.

Eine niedrige Teilchenkonzentration erzeugt durch geringen Lösungsmiteleinstrom einen vergleichsweise niedrigen osmotischen Druck.

Die Osmolarität

Aufgrund der Abhängigkeit des osmotischen Druckes von der Konzentration osmotisch wirksamer Teilchen wurde ähnlich der Konzentrationsangabe in **mol/l** (*Molarität*) die Osmolarität eingeführt, wobei diese osmotische Wirkkonzentration entsprechend in **osmol/l** angegeben wird.

Bei Vielkomponentenlösungen, wie z.B. dem Blutplasma, ist die Osmolarität von der Gesamtkonzentration aller osmotisch wirksamen Teilchen abhängig und beträgt etwa 0,3 osmol/l. Lösungen (z.B. Infusionen), die dieselbe Osmolarität wie das Blutplasma aufwei-

sen, werden als **isotone Lösungen** bezeichnet. Die wohl bekannteste isotone Lösung ist die sogenannte physiologische Kochsalzlösung. Sie besitzt eine Konzentration von 9 g NaCl pro Liter Lösungsmittel, was einer osmotischen Wirkkonzentration von etwa 0,3 osmol/l entspricht. Sie ist eine - im Klinikalltag oft einfach nur als „Nazl“ bezeichnete - Basislösung für intravenöse Injektionen.

S. 37 R.

- **Störungen der Plasmaosmolarität**

Die Plasmaosmolarität muß konstant gehalten werden, da es sonst zu gefährlichen Flüssigkeitsverschiebungen zwischen den Flüssigkeitsräumen kommen kann.

Normalerweise befinden sich die roten Blutkörperchen im isotonen Milieu des Blutplasmas und zeigen dann auch die typische, rund-ovale Scheibenform. Erhöht sich die Konzentration osmotisch wirksamer Teilchen im Plasma (hypertone Lösung), so strömt nun aus osmotischen Gründen Wasser aus den roten Blutkörperchen und läßt sie schrumpfen. Solche geschrumpften roten Blutkörperchen bezeichnet man als Stechapfelformen.

Sinkt andererseits die Konzentration osmotisch wirksamer Teilchen im Plasma (hypotone Lösung), so strömt nun aus osmotischen Gründen Wasser in die roten Blutkörperchen und läßt diese anschwellen, wobei sie eine kugelige Gestalt annehmen. Bei starkem Konzentrationsunterschied von osmotisch wirksamen Teilchen kann der Flüssigkeitseinstrom so ausgeprägt sein, daß die roten Blutkörperchen platzen.

Der kolloidosmotische Druck

Welcher osmotische Druck zwischen zwei Flüssigkeitsräumen wirksam wird, hängt entscheidend davon ab, welche Teilchen die dazwischenliegende, semipermeable Membran passieren können. Die Kapillärwände, die die Grenze zwischen dem Blutplasma und der interstitiellen Flüssigkeit darstellen, sind wegen der relativ großen Poren ihrer Basalmembran für kleinmolekulare Stoffe, wie z.B. Glukose oder gelöste Salze, durchlässig. Als Schranke wirken sie nur für die im Plasma gelösten, riesigen Proteine (Molekulargewicht über 60 000 Dalton; 1 Dalton = Molekulargewicht von 1 Wasserstoffatom). Da solche Proteinmoleküle auch als **Kolloide** bezeichnet werden, nennt man den osmotischen Druck, den sie erzeugen, kolloidosmotischen Druck.

Sinkt die Konzentration von Plasmaproteinen im Blutplasma ab, so ist die Reabsorption von Flüssigkeit, das heißt der Übertritt von Flüssigkeit aus dem Interstitium in die Kapillaren, vermindert. Klinisch macht sich dies in Form von Ödemen bemerkbar.

Passive Transportprozesse - Filtration

Unter Filtration versteht man den Transport von Flüssigkeiten durch eine semipermeable Membran, wobei die Menge der abgefilterten Flüssigkeit (Filtrat) von der Druckdifferenz zwischen beiden Seiten der Membran und der Membranfläche abhängig ist.

Im menschlichen Organismus erfolgt die Filtration vorwiegend im Bereich der Blutkapillaren, wobei der durch den Herzschlag erzeugte Druck in den Kapillaren, der hydrostatische Druck, zum Abpressen von Blutplasma ins Interstitium führt.

Andererseits kehren sich die Druckverhältnisse im venösen Schenkel der Kapillaren um und Flüssigkeit wird nun ins Blutgefäß zurückgepreßt.

S. 38 U.L.

Aktiver Transport

Aktiver Transport bedeutet die Beförderung einer Substanz durch die Zellmembran mit Hilfe eines Transportsystems. Die dafür notwendige Energie wird aus dem Zellstoffwechsel zur Verfügung gestellt. Ein solcher Transportprozeß ist, im Gegensatz zu allen passiven Transportmechanismen, in der Lage, eine Substanz auch gegen ein Konzentrationsgefälle durch die Membran zu befördern.

Über diese aktive Transportmechanismen werden insbesondere unterschiedliche Ionenkonzentrationen beidseits der Zellmembran, also zwischen dem Zellinneren und dem Interstitium, aufrechterhalten.

Diese unterschiedlichen Ionenkonzentrationen sind lebenswichtig z.B. für die Erregbarkeit von Nervenzellen. Sie können innerhalb und außerhalb der Zelle nur aufrecht erhalten werden, weil bestimmte Tunnelproteine in der Membran ständig Kaliumionen ins Zellinnere ein- bzw. Natriumionen aus der Zelle ausschleusen (Natrium-Kalium-Pumpe). Da dieser Transport gegen das bestehende Ionen-Konzentrationsgefälle gerichtet ist, verbraucht er Energie, die durch Spaltung von ATP-Molekülen in der Zelle bereitgestellt wird.

Der Bläschentransport

Die beschriebenen aktiven und passiven Transportprozesse durch die Zellmembran beziehen sich auf kleinmolekulare Substanzen. Für größere Partikel ist die Membran an sich undurchlässig. Um trotzdem z.B. Reste abgestorbener Zellen oder synthetisierte Eiweißkörper durchzulassen, sind besondere Mechanismen erforderlich:

Im Falle der **Aufnahme** funktioniert dies folgendermaßen: Das aufzunehmende Teilchen wird von Ausläufern des Zelleibs, den **Pseudopodien** umflossen. Wenn das Teilchen vollständig umgeben ist, kommt es zum Verschmelzen der äußeren Zellmembran. Das auf diese Weise eingeschlossene Teilchen befindet sich nun in einem von der Membran umgebenen Bläschen. Dieses Bläschen löst sich schließlich von der äußeren Zellmembran ab und schwimmt frei im Zelleib. Gewöhnlich verschmilzt das so gebildete Bläschen mit Lysosomen und der Inhalt wird abgebaut.

Falls dies nicht gelingt, bleibt das Partikel unter Umständen einfach unverdaut im Zytoplasma liegen (z.B. phagozytierte Teerpartikel in den Zellen der Lunge).

Man bezeichnet die Aufnahme von Makromolekülen und größeren Partikeln in die Zelle über den beschriebenen Vorgang allgemein als **Endozytose**. Eine Form der Endozytose ist die Phagozytose („Zellfressen“). Viele Abwehrzellen sind auf Phagozytose spezialisiert, das heißt, sie sind in der Lage, Fremdkörper oder Bakterien über den Endozytosemechanismus „aufzufressen“.

Zellen können aber auch umgekehrt Makromoleküle nach außen **abgeben**, insbesondere diejenigen Zellen, die auf die Herstellung und Ausschüttung von Hormonen oder Drüsensekreten spezialisiert sind. Dann läuft der beschriebene Bläschentransport genau in umgekehrter Richtung ab (Exozytose).

Die Proteinsynthese

Proteine (EiweiÙe) bestimmen maßgeblich den Aufbau bzw. die Struktur der Zelle, beispielsweise als Bestandteile der Zellmembran, der Mikrofilamente, der Mikrotubuli und vieler anderer Teile der Zelle. Außerdem regulieren sie als Enzyme alle chemischen Reaktionen in der Zelle und sind deshalb für die Funktion der Zelle von entscheidender Bedeutung.

Für alle Zellen des menschlichen Organismus steht eine bestimmte Funktion im Vordergrund: die Herstellung von Proteinen. Man kann die Zellen deshalb auch als kleine „Proteinfabriken“ betrachten, die ständig eine große Zahl unterschiedlicher Proteine produzieren. Beim Menschen findet die Proteinbiosynthese nicht im Zellkern, wo in Form der DNA die Erbinformation für alle Proteine lagert, sondern außen im Zytoplasma an den Ribosomen statt. Diese räumliche Trennung zwischen dem Sitz der genetischen Information im Zellkern und der Produktion der Proteine an den Ribosomen im Zytoplasma macht eine Zwischenkopie der im genetischen Code niedergelegten genetischen Information erforderlich. Diese Zwischenkopie bringt die Information vom Zellkern zu den Ribosomen im Zytoplasma.

Der genetische Code

Der genetische Code der DNA enthält, wie erwähnt, die Baupläne für Proteine. Anders gesagt: Alle genetische Information wird durch EiweiÙe zum Ausdruck gebracht, wobei der genetische Code sozusagen die Übersetzungsvorschrift darstellt. Dabei bilden jeweils drei aufeinanderfolgende Basen des DNA-Stranges eine Dreiergruppe, die man auch als **Basentriplett** (DNA-Triplett) bezeichnet. Ein solches Basentriplett der DNA kodiert jeweils eine Aminosäure, die Bestandteil eines bestimmten Proteins wird.

Der Informationsgehalt *eines* Basentriplets bestimmt also den Einbau *einer* speziellen Aminosäure in ein Protein bei der Proteinbiosynthese. Durch Verwendung der vier Basen als „Buchstaben“ der Schrift des genetischen Codes, nämlich:

- Adenin (A)
- Thymin (T)
- Guanin (G) und
- Cytosin (C)

ergeben sich für den Aufbau eines Triplets $4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ verschiedene Kombinationsmöglichkeiten.

In menschliche Proteine werden jedoch nur 20 verschiedene Aminosäuren eingebaut. Die übrigen 44 Möglichkeiten werden aber trotzdem genutzt: einerseits werden die meisten Aminosäuren durch mehrere Codes kodiert, andererseits werden einige Steuercodons z.B. für das Starten und Beenden einer Aminosäurenkette benötigt.

S. 39 L.

3 D MITTE

Die Transkription

Der erste Schritt der Übertragung von genetischer Information vom Zellkern ins Zytoplasma besteht in der Herstellung einer Zwischenkopie der DNA, der **messenger-Ribonukleinsäure** oder kurz **m-RNA**. Dieser Vorgang wird als **Transkription** bezeichnet. Dazu entspiralisiert sich die DNA-„Strickleiter“, und der Doppelstrang zwischen den kor-

respondierenden Basen bricht auf. An den nun freiliegenden Triplets können sich RNA-Moleküle anlagern, die sich verketteten und damit die einsträngige m-RNA bilden. Die gebildeten Triplets der m-RNA sind sozusagen „das Spiegelbild“ der Triplets auf dem kodierten DNA-Strang. Üblicherweise bezeichnet man ein solches m-RNA-Triplett als **Codon**.

Bei der m-RNA ist - im Unterschied zur DNA die Base Thymin durch **Uracil** ersetzt, und anstatt des Zuckermoleküls **Desoxiribose** findet sich **Ribose**. Die neugebildete Messenger-RNA wandert dann durch die Pore der Kernmembran zu den Ribosomen ins Zytoplasma, wo sie bei der Translation als Matrize dient.

3 D OBEN

Die Translation

Als **Translation** bezeichnet man die Übersetzung des m-RNA-Codes in die Aminosäuresequenz der Proteine an den Ribosomen. Sobald die m-RNA ein Ribosom erreicht, verkoppeln sich dessen beide Untereinheiten, und die Proteinbiosynthese beginnt. Als Adaptermoleküle fungieren dabei die relativ kleinen, beweglichen transfer-Ribonukleinsäuren (t-RNA).

Die kleeblattartig gefaltete t-RNA transportiert die Aminosäuren, die in der Zelle verstreut liegen, dann zu den Ribosomen und bringt sie dort nach den Anweisungen der m-RNA an die vorgesehene Stelle in der Peptidkette. An jeder t-RNA hängt wie ein Rucksack eine Aminosäure. Ein spezifisches Triplett bestimmt eine Aminosäure, und weil dieses Triplett den Code der m-RNA in den der DNA rückübersetzt, wird es als **Anticodon** bezeichnet.

Abschluß der Proteinbiosynthese

Das Ende des Zusammenbaus eines Proteins am Ribosom ist dann erreicht, wenn an der m-RNA statt des Codons für eine weitere Aminosäure das Steuercodon für das Ende der Aminosäurekette (**Stop-Codon**) auftritt. Auf ein solches Stop-Codon paßt dann kein entsprechendes Anticodon einer t-RNA mehr - das heißt, es wird keine weitere Aminosäure dem Peptidstrang angefügt.

Die fertiggestellten Proteine stehen dann z.B. als Enzym, als Strukturprotein oder als Hormon, das die Zelle verläßt, zur Verfügung.

Der Genbegriff

Basierend auf den heutigen Kenntnissen über die Proteinsynthese läßt sich der Begriff **Gen** folgendermaßen definieren:

Ein Gen ist ein aus vielen Basentriplets bestehender Abschnitt der DNA, der den Code für die Bildung eines bestimmten Proteins enthält. Menschliche Gene bestehen im Durchschnitt aus etwa 1000 Basentriplets, deren Abfolge (Sequenz) auf der DNA genau definiert ist.

S. 41 L.

Die Teilung von Zellen

Neue Körperzellen entstehen ausschließlich durch Teilung bereits vorhandener Zellen. Ständig müssen Zellen neu gebildet werden, um Wachstumsvorgänge zu ermöglichen, und ersetzt werden, weil ständig und überall im Organismus Zellen zugrunde gehen.

Die Mitose

Die häufigste Art der Zellteilung ist die **Mitose**, wobei das Kernmaterial erbgleich von der Mutterzelle an zwei bei der Mitose entstehende Tochterzellen weitergegeben wird. Dies erfordert, daß zuvor die Erbsubstanz der Mutterzelle, also die in den Chromosomen enthaltene DNA, verdoppelt werden muß. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Replikation** der DNA.

S. 41 R. 1.

Die DNA-Replikation

Die Replikation der DNA findet schon vor der eigentlichen Mitose in der sogenannten **Interphase** statt. Dies ist die Phase zwischen (*inter = zwischen*) zwei Zellteilungen. Hierzu wird die DNA wie ein Reißverschluß in der Mitte, also zwischen den korrespondierenden Basen, aufgetrennt. An die freiwerdenden Basen beider Stränge lagern sich dann, der spezifischen Basenpaarung folgend (Adenin zu Thymin, Guanin zu Cytosin), neue Nukleotide an. Diese werden unter Mithilfe von Enzymen zu einem neuen Strang verknüpft. Damit sind zwei neue Doppelstränge entstanden, die mit dem ursprünglichen Doppelstrang völlig identisch sind. Diese neuen Doppelstränge bestehen jeweils aus einer „alten“ und einer „neuen“ Hälfte und nehmen auch wieder die Form der DNA-Doppelhelix an.

Auf diese Weise wird die DNA sämtlicher Chromosomen vor der eigentlichen Zellteilung in der Interphase verdoppelt, wobei aus einem Chromosom zwei Chromatiden entstehen. Das Zentriolenpaar verdoppelt sich in der Interphase auch.

S. 41 R. 2.

Die Phasen der mitotischen Zellteilung

Die Mitose, bei der als wichtigster Vorgang die Chromatiden auf zwei neue Kerne verteilt werden, verläuft in vier Kernteilungs-Phasen:

Der **Prophase**, **Metaphase**, **Anaphase** und **Telophase**.

Die Prophase. Die im Ruhekern als lange, unsichtbare Fäden vorliegenden Chromosomen verkürzen sich in dieser Phase durch zunehmende Spiralisierung. Im Mikroskop erkennt man, daß jedes Chromosom bereits in seiner verdoppelten Form - den am Zentromer zusammenhängenden Chromatiden - vorliegt.

Ferner lösen sich die **Nukleoli** (Kernkörperchen) auf, und die beiden Zentriolenpaare rücken auseinander und wandern zu gegenüberliegenden Enden der Zelle, den Zellpolen. Von den beiden Zentriolenpaaren ausgehend wachsen dann sogenannte Mikrotubuli (s. unten) auf das jeweils gegenüberliegende Zentriolenpaar zu, bis sie schließlich von einem Zellpol bis zum anderen reichen. Die so gebildete **Mitosespindel** steuert zusammen mit den Mikrotubuli die Bewegung der Chromatiden während der weiteren Teilungsvorgänge.

Die Prophase endet mit der Auflösung der Kernhülle, wodurch die zusammenhängenden Chromatiden ins Zytoplasma freigesetzt werden.

S. 41 R. 3

Die Metaphase. In der Metaphase ordnen sich die zusammenhängenden Chromatiden in der Mittelebene (Äquatorialebene) der Zelle zwischen den beiden Spindelpolen an und bilden dabei eine sternförmige Figur. Die inzwischen vollständig ausgebildete Teilungsspindel besteht nun aus Mikrotubuli, die einerseits von Zellpol zu Zellpol reichen, andererseits aber auch als Chromosomenfasern an den Zentromeren ansetzen.

S. 41 R. 4

Die Anaphase. Die Anaphase beginnt mit dem Auseinanderweichen der Zentriere aller Chromosomen. Die dadurch voneinander getrennten Chromatiden werden dann durch die an den beiden Zentromerenhälften ansetzenden Chromosomenfasern zu den entgegengesetzten Zellpolen bewegt. Mit der Trennung der beiden identischen Chromatiden wird jedes von ihnen nun wieder als (einfaches) Chromosom bezeichnet.

S. 41 R. 5

Die Telophase. Das letzte Stadium der Mitose, die Telophase, ist in vieler Hinsicht die Umkehrung der Prophase. Die sich an beiden Polen befindlichen, identischen Chromosomensätze werden von Membranen umgeben, wodurch neue Kernhüllen entstehen. Die Chromosomen in den neuen Kernen werden entspiralisiert, wodurch das typische Chromatin-Muster des Zellkerns in Ruhe erscheint. Die Mitosespindel verschwindet, und die Nukleoli erscheinen wieder. Damit ist der Kernteilungszyklus beendet.

S. 42 L.O.

Die Teilung des Zelleibs

Die Kernteilung wird üblicherweise von der Zellteilung begleitet. Sie beginnt meist schon in der späten Anaphase und wird in der Telophase abgeschlossen. Hierbei schnürt sich die Zellmembran etwa in Zellmitte vom Rand her zunehmend ein, bis schließlich zwei etwa gleich große Tochterzellen mit eigenem Zytoplasma und Organellen entstanden sind. Nicht jede Kernteilung muß auch von einer Zellteilung begleitet sein. Vielkernige Zellen, z.B. die Skelett- oder Herzmuskelzellen, vermehren bei Bedarf die Kernzahl ohne gleichzeitige Zellteilung. Dies erfolgt allerdings meist durch **Amitose**, einer direkten Durchschnürung des Zellkerns, bei der weder Chromosomen sichtbar werden noch ein Spindelapparat ausgebildet wird.

S. 42 R.O.

Die Phasen des Zellzyklus

Ein Zellzyklus besteht aus zwei Phasen:

- Der Mitosephase,
- Der Interphase, (die Zeit zwischen zwei Zellteilungen); sie setzt sich zusammen aus G₁-, S- und G₂-Phase (MONITOR).

Nach der Mitose tritt die neu gebildete Zelle zunächst in die sogenannte **präsynthetische Wachstumsphase (G₁-Phase)** ein. In dieser Phase läuft die Proteinbiosynthese auf Hochtouren und trägt maßgeblich zur Vergrößerung der Zelle bei. Die Dauer dieser Phase

schwankt zwischen wenigen Stunden und unter Umständen mehreren Jahren und bestimmt im wesentlichen die Dauer des gesamten Zellzyklus.

In der sich anschließenden, etwa 5 bis 10 Stunden dauernden **Synthesephase (S-Phase)** erfolgt die Verdoppelung der DNA, also die Bildung der Chromatiden.

Die letzte, etwa vierstündige Phase, vor der Mitose heißt **postsynthetische Wachstumsphase (G₂-Phase)**. Hier liegen die Chromosomen also bereits in verdoppelter Form als Chromatiden vor.

S. 42 U.L.

Die Meiose

Damit sich bei der Vereinigung von Eizelle und Spermium das Erbgut nicht verdoppelt, ist bei der Entwicklung der unreifen Geschlechtszelle zu reifen Formen (**Gameten**) eine besondere Form der Zellteilung erforderlich. Hierbei wird der normale, **diploide** Chromosomensatz (2 · 23 Chromosomen) auf einen **haploiden** Satz (1 · 23 Chromosomen) reduziert - man spricht deshalb auch von einer **Reduktionsteilung**.

Die Meiose umfaßt zwei Teilungsschritte:

- Die *erste Reifeteilung*, bei der der diploide Chromosomensatz auf den haploiden reduziert wird (Reduktionsteilung).
- Die *zweite Reifeteilung* entspricht einer normalen mitotischen Teilung - allerdings des haploiden Chromosomensatzes.

In der Prophase der ersten Reifeteilung kommt es ebenfalls zu einer Verkürzung und Verdichtung der bereits verdoppelten Chromosomen. Danach lagern sich homologe Chromosomen, also die sich entsprechenden Chromosomen väterlicher und mütterlicher Herkunft, parallel aneinander, so daß die entsprechenden Genabschnitte genau nebeneinander zu liegen kommen. Da jedes Chromosom zu diesem Zeitpunkt schon aus 2 Chromatiden besteht, entsteht ein Gebilde, eine sogenannte **Tetrade**, die aus 4 Chromatiden (je 2 mütterlicher und väterlicher Herkunft) besteht.

Dieses Aneinanderlagern wird anschließend wieder gelöst, wobei sich aber Abschnitte, die intensiv aneinander haften, miteinander überkreuzen können. An solchen Überkreuzungsstellen, **Chiasmata** genannt, können die Chromatiden verschmelzen und derart wieder auseinanderbrechen, daß Bruchstücke des väterlichen und des mütterlichen Chromosoms vertauscht werden.

Dieses **crossing over** führt zu einer Neuverknüpfung der Gene (Rekombination) innerhalb von Chromosomen. In den weiteren Phasen der ersten Reifeteilung werden *nicht* wie bei der normalen Mitose die Chromatiden, sondern die beiden homologen Chromosomen (bestehend aus je 2 Chromatiden) auf die Tochterkerne verteilt, indem sie vom Spindelapparat zu den Zellpolen gezogen werden.

Durch die parallel einsetzende Zellteilung entstehen zwei Tochterzellen mit je 23 noch verdoppelten Chromosomen. Die sich nun anschließende zweite Reifeteilung entspricht der einer normalen mitotischen Teilung, wobei jetzt die Chromatiden auf die Tochterzellen verteilt werden.

Nach Abschluß der beiden Reifeteilungen sind aus einer männlichen unreifen Geschlechtszelle mit normalem diploiden Chromosomensatz vier reife Spermien mit haploidem Chromosomensatz (1 · 23 Chromosomen) entstanden. Bei der unreifen weiblichen

Geschlechtszelle entsteht durch die Meiose jedoch nur ein reifes Ei. Verschmelzen männliche und weibliche Kerne bei der Befruchtung, so hat die entstandene Zygote wieder den normalen diploiden Chromosomensatz.