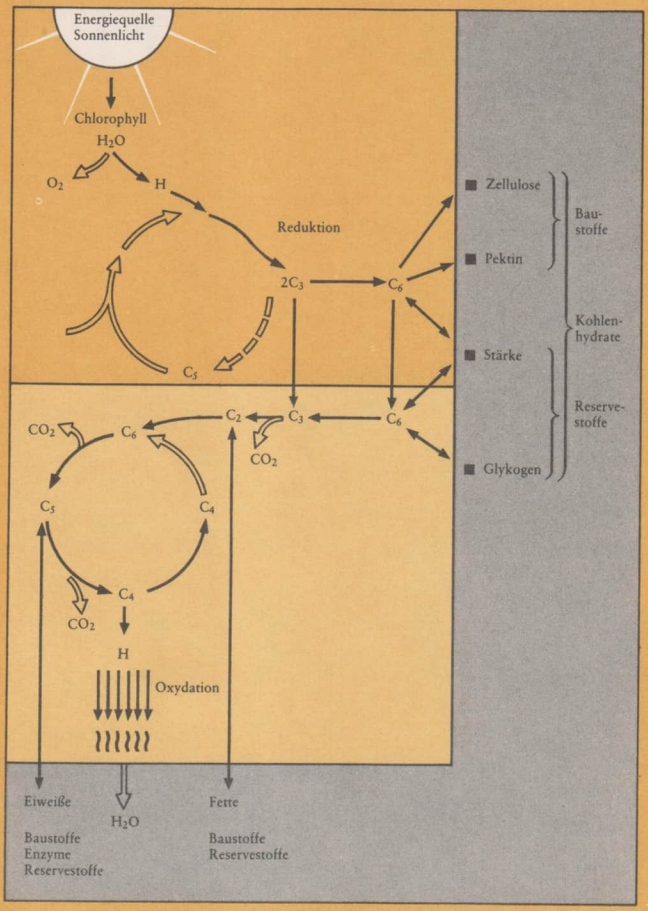
BIOLOGIE


Energiequelle
Sonnenlicht
Chlorophyll
H_2O
O_2
H
Reduktion
$2C_3$
C_6
C_5
Zellulose
Pektin
Bau-
stoffe
Kohlen-
hydrate
Stärke
Reserve-
stoffe
Glykogen
C_2
C_3
C_6
CO_2
C_6
CO_2
C_5
C_4
C_4
CO_2
H
Oxydation
Eiweiße
H_2O
Fette
Baustoffe
Enzyme
Reservestoffe
Baustoffe
Reservestoffe
Pflanzen
Tiere

BIOLOGIE

Physiologie
Genetik

Lehrbuch für Klasse 12

Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1986

Autoren:
Prof. Dr. Klaus Müntz, Ute Püschel, Dr. Klaus Richter, Prof. Dr. Karl Sommer
Bildautor (Fotos): Horst Theuerkauf

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt.

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1981
3. Auflage
Lizenz-Nr. 203 · 1000/85 (DN 01 12 55-3)
LSV 0681
Redaktion: Ute Püschel, Gertrud Kummer
Gesamtgestaltung: Manfred Behrendt / Günter Wolff
Zeichnungen: Hans-Joachim Behrendt, Eberhard Graf
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Schrift: 9/9/10 Sabon Linotron
Redaktionsschluß: 25. Oktober 1985
Bestell-Nr. 730 862 7
Schulpreis DDR: 3,20

Inhalt

Die Zelle als morphologische und physiologische Grundeinheit des Lebens 5

Übersicht über Bau und Funktionen der Zellen 6

Stoffaustausch 19

Diffusion und Osmose als physikalische Prozesse des Stoffaustausches der Zellen 20

Die Zellen der Lebewesen als osmotische Systeme 22

Wasser- und Nährstoffaufnahme bei Pflanzen; Stofftransport 24

Stoffwechselphysiologie 27

Stoffwechsel als grundlegende Lebensfunktion 28

Autotrophe Assimilation 34

Heterotrophe Assimilation 57

Dissimilation 65

Zusammenwirken der Stoffwechselvorgänge 84

Reiz- und Bewegungsphysiologie 93

Reize 94

Erregung 100

Reaktion 108

Reizbeantwortung bei Pflanzen 115

Vergleichende Betrachtung zur Reizbarkeit bei Tieren und Pflanzen 117

Individualentwicklung 119

Entwicklungsphasen mehrzelliger Tiere und des Menschen 120

Ontogenese des Menschen 125

Genetik 135

Relative Konstanz und Variabilität 136
Speicherung und Übertragung genetischer Informationen 141
Realisierung der genetischen Information 162
Veränderungen der genetischen Information durch Mutationen 173
Anwendung der Erkenntnisse genetischer Forschung 185

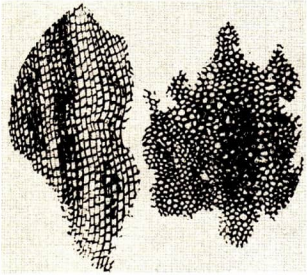
Register 189

Zeichenerklärung

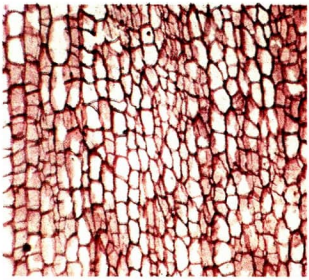
Jeder Hauptabschnitt des Lehrbuches ist durch eine Randmarke mit der Darstellung eines Symbols gekennzeichnet.

① Aufgaben und Fragen
▶ In diesen Abschnitten werden wichtige Aussagen zusammengefaßt (Zusammenfassungen, Merksätze).
▼ Diese Pflanze oder dieses Tier stehen unter Naturschutz
♂ männlich (Männchen)
♀ weiblich (Weibchen)
⚥ zwittrig (Zwitter)
↗ Hinweis auf andere Seiten des Buches
■ Beispiel, beispielsweise
Bio i Ü Biologie in Übersichten

Die Zelle als morphologische und physiologische Grundeinheit des Lebens



HOOKEs Darstellung von Zellen im Flaschenkork



Korkzellen (300 : 1)

Der englische Forscher Robert HOOKE beschrieb 1667 anhand von mikroskopischen Untersuchungen den Aufbau von Flaschenkork aus Zellen. Erst in der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts, nach der Entwicklung leistungsstärkerer optischer Hilfsmittel und der Verfeinerung der Untersuchungsmethoden (■ Färbungen), wurde erkannt, daß nicht nur bestimmte pflanzliche Gewebe, sondern daß alle Lebewesen aus Zellen bestehen. Aufbauend auf dieser Erkenntnis entwickelten die beiden deutschen Wissenschaftler SCHLEIDEN und SCHWANN (1838 bzw. 1839) die wissenschaftliche Zellenlehre, die durch die Arbeiten des tschechischen Arztes PURKINJE (1839), der den lebenden Zellinhalt, das Protoplasma, entdeckte, erweitert wurde.

Seitdem haben zahlreiche Untersuchungen an Bakterien-, Tier- und Pflanzenzellen die Zellenlehre bestätigt.

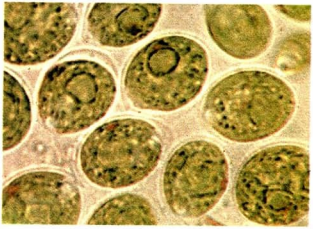
Alle Lebewesen bestehen aus Zellen, die prinzipiell gleich gebaut sind, wenn sie auch durch Spezialisierung und Angepaßtheit an bestimmte Funktionen in der einen oder anderen Weise Abänderungen zeigen können (■ Einlagerung von Farbstoffen, Ausbildung und Verstärkung von Zellwänden).

▶ *Die Zellen aller Lebewesen weisen in den Grundzügen den gleichen Bau auf und sind grundsätzlich in der Lage, alle wesentlichen Lebensfunktionen in gleicher Weise auszuüben.*

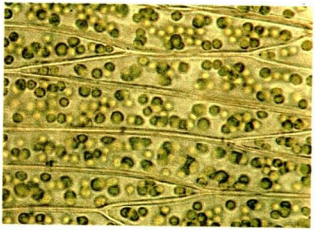
In der Zelle als Grundbaustein aller Lebewesen drückt sich die Einheit in der lebenden Natur aus. ①

① Begründen Sie anhand Ihrer Kenntnisse aus Anatomie und Systematik die These, daß Leben an zelluläre Strukturen gebunden ist!

Übersicht über Bau und Funktionen der Zellen

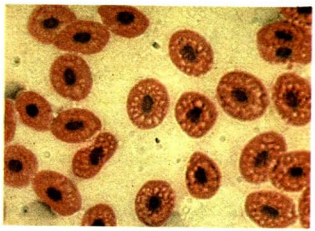


Einzellige Algen (600:1)



Zellen aus einem Moosblättchen (600:1)

Haarzellen bei Ölweide (600:1)



Blutzellen eines Frosches (600:1)

Das derzeitige Wissen über Bau und Funktionen der Zellen gründet sich auf die Beobachtung und experimentelle Untersuchung ganzer Zellen und Gewebe im lebenden oder fixierten Zustand unter dem Licht- und Elektronenmikroskop sowie auf die Untersuchung einzelner Zellbestandteile, die nach Zerstörung der Zellwand und der äußeren Plasmamembran durch Zentrifugation isoliert werden können. ①②

► *Durch die Beobachtung biochemischer Reaktionen an ganzen Zellen unter dem Mikroskop und die Untersuchung von Bau und Funktionen isolierter Zellbestandteile wird die Zuordnung bestimmter Lebensvorgänge zu den verschiedenen Zellstrukturen erkennbar.*

Wichtigster Bestandteil aller Tier-, Pflanzen- und Bakterienzellen ist das Protoplasma, das den lebenden Zellinhalt darstellt. Es bildet die unterschiedlichen Zellbestandteile (■ Zellkern, Zellorganellen) und damit die verschiedenen Reaktionsräume, welche die Grundlage der innerzellulären Ordnung nach Raum und Zeit bilden.

Der strukturlos erscheinende Anteil des Protoplasmas ist das Grundplasma.

Je nach der Funktion, die die jeweilige Zelle für die Lebensprozesse des Organismus erfüllt, kann das eine oder andere Zellorganell mehr oder weniger zahlreich ausgebildet sein oder auch ganz fehlen. Bestimmte Zellbestandteile (■ Kern, Ribosomen) sind in der Regel in allen Zellen enthalten. Meist liegen viele Zellen gleichen Baus und gleicher Funktion zusammen und bilden Gewebe (■ Fettspeichergewebe, Epidermis).

Die wichtigsten Zellbestandteile und ihre Funktionen					
Protoplasma (lebender Zellbestandteil)				**Zellwand**	**Vakuolen**
Zytoplasma			**Zellkern**	(nur bei Pflanzen und Bakterien): mechanische Stützfunktion	(Regelung osmotischer Verhältnisse, Stoffspeicherung, Stoffausscheidung, z. T. Verdauung)
Grundplasma	Membransystem	Organellen	Chromatingerüst, Kernkörperchen, Kerngrundplasma (Vererbung, Regulation von Zellfunktionen)		
(Stabilisierung des *p*H-Wertes, des Mineralstoff- und Wassergehaltes, Reaktionsraum für biochemische Reaktionen)	endoplasmatisches Retikulum, Plasmalemma Tonoplast (Protoplasmaabgrenzung, Bildung von Reaktionsräumen, Stoffauswahl)	Plastiden (bei Pflanzen: Photosynthese, Stärkespeicherung) Mitochondrien (biologische Oxydation) Ribosomen (Eiweißsynthese)			

Grundplasma. Das Grundplasma besteht aus einer wäßrigen Lösung von Salzen und niedermolekularen organischen Verbindungen (■ Zucker, organische Säuren, Aminosäuren, Wirkstoffe) sowie Eiweißen als hauptsächlichem hochmolekularem organischem Grundbestandteil. Die Eiweiße sind durch zwischenmolekulare Kräfte untereinander zu einem leicht veränderlichen dreidimensionalen Netzwerk verbunden.

Die verschiedenen Bestandteile des Grundplasmas bewirken eine Stabilisierung der Wasserstoff-Ionen-Konzentration in den lebenswichtigen Grenzen (Pufferung des *p*H-Wertes). Die Erhaltung der Wasserstoff-Ionen-Konzentration hat große Bedeutung für die Wirksamkeit der Plasmaeiweiße als Biokatalysatoren (Enzyme, ↗ S. 29ff.), die den Ablauf von Stoffwechselreaktionen überhaupt erst ermöglichen. Die meisten Eiweiße des Grundplasmas sind Bestandteile von Enzymen.

Das Grundplasma ist in ständiger Bewegung. Neben der ungerichteten Molekularbewegung, die allen Körpern eigen ist, bewegt sich das Grundplasma in bestimmten Richtungen und Bahnen. ③

Diese Bewegungen können unter dem Mikroskop an den mitbewegten Bestandteilen des Zytoplasmas beobachtet werden. Auch der Zellkern kann in diese Strömung einbezogen sein.

Ursachen und Mechanismus der Plasmaströmung sind noch unbekannt.

① Vergleichen Sie Tier- und Pflanzenzelle! Fertigen Sie eine tabellarische Übersicht über die Bestandteile an! Werten Sie das Ergebnis in bezug auf die materielle Einheitlichkeit der lebenden Natur!

② Vergleichen Sie das Auflösungsvermögen von Licht- und Elektronenmikroskop (↗ Wissensspeicher Physik, S. 277) und schlußfolgern Sie daraus auf die Größe der in den Abbildungen Seite 11 und Seite 13 dargestellten Zellbestandteile!

③ Fertigen Sie ein Frischpräparat (↗ Bio i Ü, S. 310) von Blättern der Wasserpest an! Beobachten Sie unter dem Mikroskop die Plasmaströmung!

Plasmaströmung in Staubfadenzellen von Tradeskantien (400:1)

Die Eiweißmoleküle im Grundplasma gehören einer Größenklasse von 1 nm bis zu 100 nm an. Teilchen dieser Größenklasse können kolloidale Lösungen bilden.

► *Das Grundplasma besitzt kolloidale Eigenschaften.*

Kolloidale Lösungen können im Sol- und im Gelzustand vorliegen.

Der Solzustand einer kolloidalen Lösung liegt vor, wenn die gequollenen Makromoleküle, die Kolloide, von so viel Wassermolekülen umgeben sind, daß die Verhältnisse denen einer echten Lösung ähneln. Der Gelzustand einer kolloidalen Lösung liegt vor, wenn sich mit sinkendem Wassergehalt die gequollenen Makromoleküle, die Kolloide, einander nähern und die kolloidale Lösung sich zu verfestigen („gelieren") beginnt.

► *Das Grundplasma besitzt im Gelzustand geringe Stoffwechselaktivität, mit dem Solzustand ist meist hohe Stoffwechselaktivität verbunden.* ①

Grundlage der kolloidalen Eigenschaften des Grundplasmas bilden die elektrischen Ladungen der Eiweiße. Durch Dissoziation von Karboxylgruppen der Aminosäuren besitzen die Eiweiße negative, durch Anlagerung von Protonen an die Aminogruppen positive Ladungen. Da Wassermoleküle polar gebaut sind, können sie von den elektrischen Ladungen der Eiweißmoleküle angezogen werden. Je weiter die Wassermoleküle vom jeweiligen Ladungsschwerpunkt entfernt sind, desto schwächer werden sie elektrisch gebunden. Im Gelzustand besitzt das Grundplasma nahezu nur „fest gebundenes" Wasser an den Eiweißmolekülen, die sich in dichterer Packung befinden als im Solzustand, bei dem sich zwischen den Eiweißen verhältnismäßig viel freies („ungebundenes") Wasser befindet.

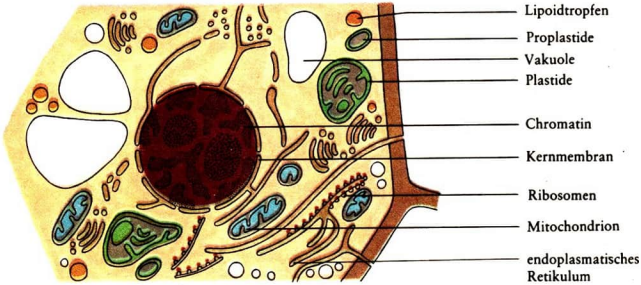
Membransysteme. Die verschiedenen Reaktionsräume innerhalb einer Zelle müssen gleichzeitig voneinander getrennt und miteinander verbunden sein. Diese Doppelfunktion erfüllen die Biomembranen, die die einzelnen Reaktionsräume begrenzen.

► *Biomembranen besitzen Eigenschaften, die die Abgrenzung und Verbindung der verschiedenen Zellbestandteile ermöglichen.*

Die wichtigsten chemischen Bausteine der Biomembranen sind Eiweiße, fettähnliche Verbindungen (Lipoide) und Fette. In den Fett- und Lipoidmolekülen besitzen die Fettsäuren stark wasserabstoßenden Charakter, während in den übrigen Molekülbestandteilen (Glyzerin, Phosphorsäurereste) wasseranziehende Eigenschaften vorherrschen. Deshalb kommt es bei derartigen Molekülen an der Grenze zum wäßrigen Milieu zu einer Ausrichtung der Moleküle, in dem alle wasseranziehenden Molekülteile zum wasserhaltigen Milieu hin, die wasserabstoßenden Teile vom Wasser entfernt angeordnet werden.

① Erläutern Sie die Tatsache, daß in den Zellen reifender Samen das Protoplasma vom Sol- in den Gelzustand übergeht!

Elektronenoptisches Bild einer jungen Pflanzenzelle

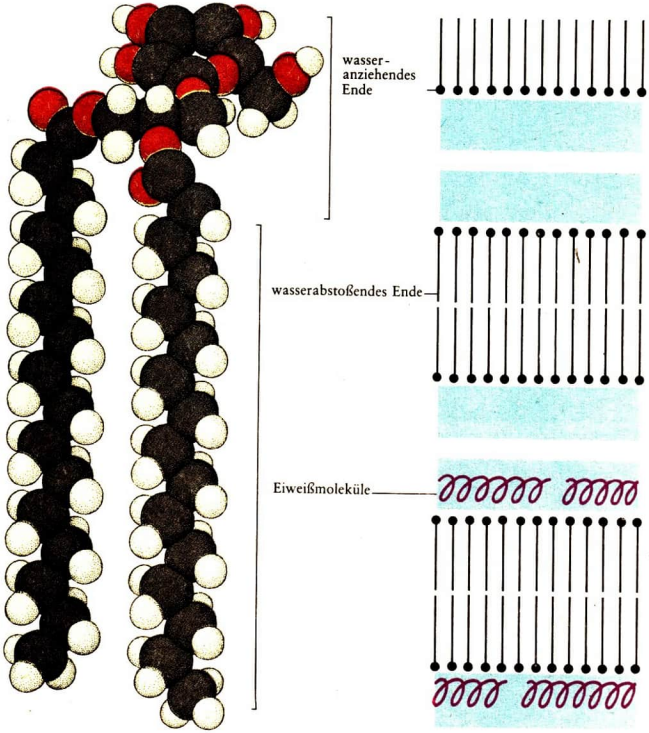


Schematische Darstellung einer jungen Pflanzenzelle

Die Grundstruktur der biologischen Membranen besteht aus zwei aneinanderliegenden „Filmen" gerichteter fettartiger Moleküle.

Die wasserabstoßenden Molekülenden sind darin einander zugewendet, während die wasseranziehenden Enden in das wäßrige Milieu der Zelle weisen; sie sind meist mit Eiweißmolekülen bedeckt. Eiweißmoleküle können jedoch auch teilweise in den Lipoidfilm eingebettet sein oder die Membran von einer zur anderen Seite durchdringen.

Da Eiweiße und Wasser die Hauptbestandteile des Grundplasmas sind, können Elementarmembranen innerhalb des Protoplasmas verschiedene Reaktionsräume gegeneinander



Schematische Darstellung des Aufbaues von Biomembranen, links: Räumliches Molekülmodell

Endoplasmatisches Retikulum in einer Pflanzenzelle (elektronenoptische Aufnahme)

Endoplasmatisches Retikulum in einer tierischen Zelle (elektronenoptische Aufnahme)

abgrenzen. Gleichzeitig ermöglichen sie den Stoffaustausch sowohl zwischen verschiedenen Zellbestandteilen als auch zwischen benachbarten Zellen, da sie durch ihre Struktur halbdurchlässige Eigenschaften besitzen (↗ S. 22f.).

Biomembranen bilden die äußere Hülle des Protoplasmas, das Plasmalemma; ebenso werden die Vakuolen durch Biomembranen, die Tonoplasten, gegen das umgebende Protoplasma abgegrenzt.

Zellkern, Plastiden und Mitochondrien sind von zwei aneinanderliegenden Membranen, sogenannten Doppelmembranen, umhüllt. Chloroplasten und Mitochondrien werden durch die innere der beiden Membranen in zahlreiche, lamellenartige Räume gegliedert.

Ein weitgehend zusammenhängendes System von membranumhüllten Räumen durchzieht in Form von Schläuchen und flachgedrückten Bläschen das Grundplasma. Es ist das innerplasmatische Membrannetzwerk oder endoplasmatische Retikulum, das im Querschnitt auf elektronenoptischen Bildern häufig als System von Doppelmembranen erscheint.

Zellkern. Der Zellkern (Nukleus) wird von der Kernmembran, einer Doppelmembran, abgegrenzt, die stellenweise Poren als Durchtrittsstellen für den Stoffaustausch mit dem Grundplasma aufweist. Innerhalb des Zellkerns sind drei weitere Kernbestandteile erkennbar: das Chromatin, ein oder mehrere Kernkörperchen und das im Elektronenmikroskop unstrukturiert erscheinende Kern-Grundplasma.

Chromatin und Kernkörperchen lassen sich mit Nukleinsäurereagenzien anfärben; sie bestehen hauptsächlich aus Nukleinsäuren und Eiweißen.

Die Nukleinsäuren des Zellkerns bestehen zu etwa 95 % aus Desoxyribonukleinsäure (DNS), an die besondere Proteine gebunden sind, und zu etwa 5 % aus Ribonukleinsäure (RNS), die vorwiegend in den Kernkörperchen gebildet wird und dort besonders konzentriert ist. Diese RNS ist zu einem bedeutenden Teil an der Bildung der Ribosomen beteiligt.

Das Kerngrundplasma besteht vorwiegend aus Eiweiß und Wasser, daneben enthält es auch geringe Mengen an Nukleinsäuren. Der Zellkern erfüllt zwei Hauptfunktionen in der Zelle, die mit strukturellen Veränderungen innerhalb des Kerns verbunden sind.

Vor der Zellteilung entwirrt sich der DNS-Eiweiß-Komplex des Chromatins durch Spiralisierung und bildet die geformten Chromosomen. In dieser Form wird die in der DNS verschlüsselte Erbinformation bei der Zellteilung an die nächste Zellgeneration weitergegeben.

► *Der Zellkern dient der Übertragung der Erbinformation im Verlaufe der Zellteilung.*

In nicht mehr teilungsfähigen Zellen und in den Perioden zwischen zwei Zellteilungen liegt das Chromatin nicht in Gestalt von Chromosomen vor; der Informationsgehalt der in ihm konzentrierten DNS wird über Boten-RNS an das Zytoplasma weitergegeben und bestimmt dort die Eiweißsynthese.

► *Der Zellkern dient der Speicherung der Erbinformation und ihrer Weitergabe an die Orte der Eiweißsynthese während des Zellwachstums und der Zellentwicklung.*

Die Hauptfunktionen des Zellkerns werden in teilungsfähigen Zellen nicht gleichzeitig, sondern in bestimmter zeitlicher Folge verwirklicht.

Plastiden. Plastiden sind die größten Bestandteile des Zytoplasmas. Sie kommen nur in Pflanzenzellen vor. Entsprechend der jeweiligen Plastidenfärbung, die durch Farbstoffe oder andere Inhaltsstoffe hervorgerufen wird, werden Chloroplasten, Chromoplasten und Leukoplasten unterschieden.

Chloroplasten erscheinen wegen ihres Chlorophyllgehaltes grün, Chromoplasten meist gelb, da sie reich an Karotinen sind, während die kugeligen bis eiförmigen Leukoplasten farblos bis weiß erscheinen, da sie viel Stärke enthalten.

Die Chloroplasten sind als Orte der Photosynthese besonders wichtig für die Pflanzenzellen. In Form kleiner kugeliger Vorstufen, der Proplastiden, sind sie bereits in embryonalen Zellen enthalten.

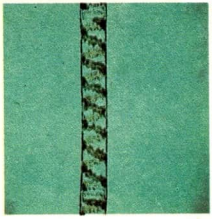
Aus den Proplastiden entwickeln sich, häufig nur unter Lichteinwirkung, die voll ausgebildeten Chloroplasten (■ für Entwicklungssteuerung durch die Umwelt). In nicht belichteten Teilen grüner Pflanzen wird das Chlorophyll oft abgebaut. ①

► *In den Chloroplasten findet die Photosynthese statt.*

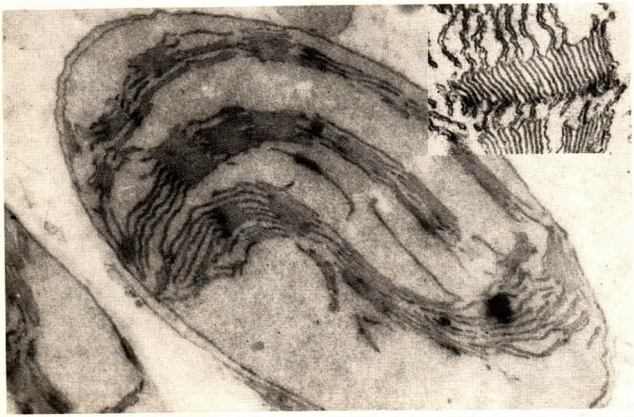
Chloroplasten sind bei den einzelnen Pflanzenarten unterschiedlich geformt. ②

Wie alle Plastiden sind die Chloroplasten von einer Doppelmembran umgeben. Aus der inneren der beiden Membranen entwickelt sich im Verlaufe der Chloroplastenentwicklung ein System von parallel gelagerten flachen, membranumhüllten Räumen, die, an bestimmten Orten stark vervielfacht, die sogenannten Grana bilden.

Dieses innere Membransystem der Chloroplasten ist in eine unstrukturierte, dem Grundplasma ähnliche Substanz, die Matrix, eingebettet. In den Membranen befinden sich Komplexe aus Chlorophyll und Trägereiweiß, die Pigment-Eiweiß-Komplexe, an denen unter



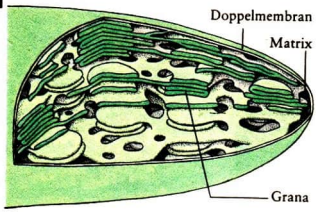
Unterschiedliche Chloroplastenformen



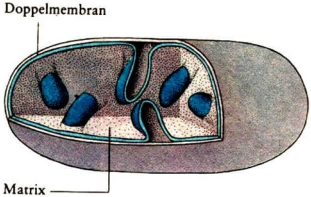
Querschnitt durch einen Chloroplasten (elektronenoptische Aufnahme). Rechts oben: Grana-Bereich in stärkerer Vergrößerung

Lichteinfluß die ersten Reaktionsschritte der Photosynthese ablaufen. Andere Eiweiße in den Membranen führen die unmittelbar auf diese Lichtreaktionen folgenden biochemischen Umsetzungen bei der Photosynthese aus.

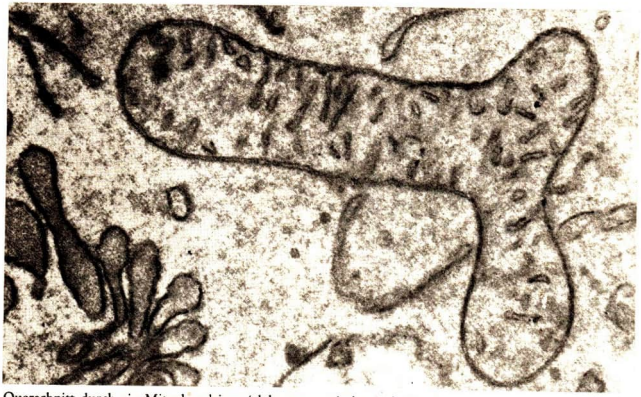
1. Planen Sie ein Experiment, aus dem die Rolle der Lichteinwirkung bei der Ausbildung von Chloroplasten deutlich wird! Begründen Sie die Anordnung des Experiments! Führen Sie das Experiment durch!
2. Stellen Sie ein Frischpräparat von Grünalgen oder von Moosblättchen her (↗Bio i Ü)! Beobachten Sie das Präparat durch das Mikroskop! Zeichnen Sie die Chloroplasten in den Zellumriß ein!



Querschnitt durch einen Chloroplasten (schematisch)



Querschnitt durch ein Mitochondrium (schematisch)



Querschnitt durch ein Mitochondrium (elektronenoptische Aufnahme)

Die Membransysteme der Chloroplasten bilden durch die Anordnung der Pigment-Eiweiß-Komplexe und anderer Eiweiße die Grundlage für die räumliche und zeitliche Ordnung der ersten Reaktionen in der Photosynthese.

Die eigentliche Assimilation des Kohlendioxids in organische Verbindungen vollzieht sich in der Matrix der Chloroplasten. Die kugeligen oder eiförmigen Leukoplasten gehen oft aus Chloroplasten hervor, indem diese vollständig mit Stärke als Photosyntheseprodukt gefüllt werden (■ Stärkekörner in Kartoffelknollen oder in Getreidekörnern). Leukoplasten kommen vorwiegend in Speicherorganen vor.

► *Leukoplasten dienen der Speicherung von Reservestärke in pflanzlichen Zellen.*

Chromoplasten kommen überwiegend in den Zellen von Kronblättern und reifen Früchten vor; sie enthalten gelbrote Farbstoffe (■ Karotin) und bewirken die Gelb- oder Rotfärbung von Pflanzenteilen (■ Blüten der Kapuzinerkresse, Tomatenfrüchte, Mohrrübenwurzeln).

Mitochondrien. Mitochondrien kommen in allen lebenden Zellen vor. Sie sind wesentlich kleiner als Plastiden, aber ebenso wie diese von einer Doppelmembran umgeben. Mitochondrien sind kugelförmig oder stäbchenförmig. Ähnlich wie bei den Chloroplasten ist der Innenraum der Mitochondrien in ein System von Schläuchen oder flachen Lamellen und Leisten gegliedert, das von der inneren Membran der umhüllenden Doppelmembran gebildet wird.

Ähnlich wie bei den Chloroplasten sind auf den inneren Membranen der Mitochondrien besondere Eiweiße angeordnet; diese sind an den energieumsetzenden Reaktionen bei der Atmung beteiligt. Räumliche und zeitliche Ordnung dieser Umsetzungen haben ihre Grundlage wiederum in der Struktur der Mitochondrienmembranen. ①

Ribosomen. Ribosomen sind kleine kugelige Strukturen (etwa 1,5 nm Durchmesser), die aus zwei ungleichen Teilen bestehen. Die Masse der Ribosomen besteht zu etwa gleichen Teilen aus Ribonukleinsäuren, die hauptsächlich im Kernkörperchen des Zellkerns gebildet werden, und aus Eiweißen. In Verbindung mit der Informationsübertragung durch Nukleinsäuren aus dem Zellkern erfolgt an den Ribosomen die Anordnung und Verknüpfung der Aminosäurebausteine in der jeweils richtigen Reihenfolge bei der Bildung der spezifischen Eiweiße. Sie haben deshalb eine außerordentlich wichtige Funktion bei der Verwirklichung der genetischen Information für das Wachstum und die Entwicklung der Zellen.

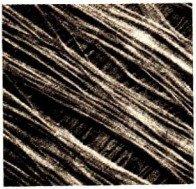
▶ *Ribosomen dienen der Realisierung der Erbinformation durch geordnete Eiweißsynthese.*

Ribosomen kommen im Zytoplasma, teilweise gebunden an die Membranen des endoplasmatischen Retikulums (↗ Abb. S. 11), in Chloroplasten und in Mitochondrien vor; das weist darauf hin, daß an allen diesen Orten in den Zellen Eiweiße synthetisiert werden können. ②

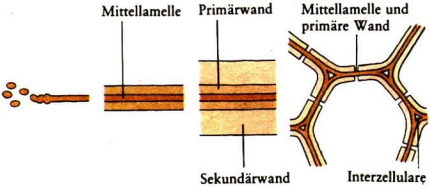
Zellwand. Zellwände kommen bei Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und allen höheren Pflanzen vor. Zellen der tierischen Organismen besitzen keine Zellwände.

Die Bildung neuer Zellwände geschieht anschließend an jede Zellteilung, sie erfolgt schrittweise und führt zu einer Schichtung der Zellwände.

In der Mittelebene zwischen zwei neu gebildeten Tochterzellen entsteht zuerst die Mittellamelle. Sie besteht vorwiegend aus Pektinen, einer Gruppe von Kohlenhydraten. Pektine werden industriell aus Pflanzen gewonnen und als Gelierungsmittel in Industrie und Haushalt verwendet.



Zellulosemikrofibrillen (nach einer elektronenoptischen Aufnahme)



Entwicklungsstadien bei der Zellwandbildung im Verlaufe des Zellwachstums

① Erläutern Sie die biologische Bedeutung der vielfachen Membraneinstülpungen bei Chloroplasten und Mitochondrien!

② Erläutern Sie die Zusammenhänge zwischen der Funktion von Ribosomen und Zellkern!

Im Verlaufe der weiteren Zellentwicklung werden der Mittellamelle, die den beiden benachbarten Zellen gemeinsam angehört, von beiden Seiten die Primärwände aufgelagert. Die Primärwände werden, wie auch die häufig folgenden Sekundärwände, vom Protoplasma der Zellen abgeschieden; ihr wichtigster Bestandteil ist Zellulose.

Die langkettigen Zellulose-Moleküle sind zu Bündeln, den Mikrofibrillen, vereinigt. Diese dienen als strukturelle Grundlage der Zellwand; sie bilden ein Netzwerk, in dessen Maschen Wasser, Kohlenhydrate und andere Stoffe (■ Lignin) eingelagert sind.

Auch plasmatische Fortsätze reichen bis in die Maschen der Primärwand, die stellenweise Poren besitzt, durch die das Protoplasma benachbarter Zellen in Verbindung steht.

Mittellamelle und Primärwände sind elastisch dehnbar und plastisch verformbar, so daß sie beim Wachstum der Zellvergrößerung folgen können.

Durch beiderseitige Auflagerung von Sekundärwänden werden die Zellwände mechanisch verfestigt und verlieren im Verlaufe der Zellentwicklung mehr und mehr ihre Elastizität und Verformbarkeit.

► *Sekundärwände kennzeichnen ausgewachsene Zellen.*

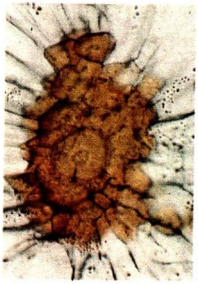
Die sekundären Wandverdickungen können unterschiedlich stark ausgebildet sein, sie können auch auf bestimmte Bereiche der Zellwände beschränkt bleiben.

An den Durchtrittsstellen des Protoplasmas in benachbarte Zellen werden in den Sekundärwänden bestimmte Stellen, die Tüpfel, ausgespart; in sehr dicken Zellwänden (■ im Holz) sehen die Tüpfel im Querschnitt kanalartig aus (Tüpfelkanäle).

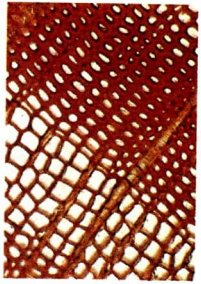
Zellwände setzen dem Durchtritt von Wasser und darin gelösten Substanzen keinen Widerstand entgegen, sie sind permeabel. Die semipermeablen Eigenschaften der Zellen beruhen auf der Struktur der Membranen, die das Zellplasma gegenüber der Zellwand abgrenzen (↗ S. 11).

In Abschlußgeweben an der Oberfläche von Pflanzen können Stoffe in die Zellwände eingelagert sein, die Wasserundurchlässigkeit bewirken (■ Korkstoff (Suberin) in Baumrinden, Kutin in der Kutikula der Blätter). Beim Verholzen von Zellwänden wird der Holzstoff Lignin in die Zellwände eingelagert.

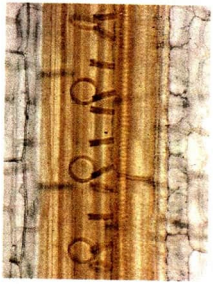
■ Zellulosefibrillen und Lignin bewirken eine Verfestigung, die der von Stahldrahtgeflecht und Beton gleicht.



Steinzellen (500 : 1)



Holzzellen (200 : 1)

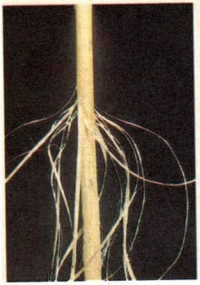


Tracheenverdickungen (500 : 1)

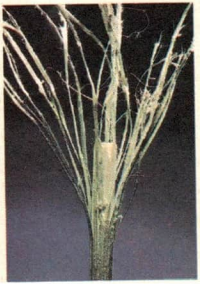
Flachs

Hanf

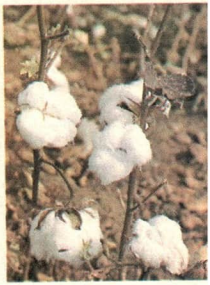
Baumwolle



Fasern aus der Sproßachse von Flachs



Fasern aus der Sproßachse von Hanf



Samenhaare der Baumwolle

Zellulose wird in großem Umfang aus pflanzlichen Rohstoffen gewonnen und wirtschaftlich genutzt. ①②

■ Zellulosefasern der Samenhaare von Baumwolle bilden die Grundlage für die Herstellung von Baumwollgeweben; Zellulosefasern aus den Sproßachsen von Flachs und Hanf sowie aus den Blättern der Sisal-Agave liefern Rohstoffe für Textil-, Seilerwaren- und Sackleinwandherstellung.

Zellulose aus Holz, Schilf oder Rückständen des Zuckerrohrs bildet den Ausgangsstoff für Zellstoff, Watte, Papier und Filme.

① Prüfen Sie Watte und Zellstoff auf das Vorhandensein von Zellulose! Informieren Sie sich über Nachweisreaktionen im Wissensspeicher Chemie!

② Prüfen Sie Holzspäne und Zeitungspapier auf das Vorhandensein von Lignin! Lignin färbt sich nach Anfeuchten mit Phlorogluzinlösung und anschließender Behandlung mit Salzsäure rot.

In früheren Epochen der Erdgeschichte sind durch geologische Prozesse aus Zellulose Kohle und Torf entstanden.

▶ *Zellwandmaterial nimmt unter den pflanzlichen Massenrohstoffen den ersten Platz in der Weltwirtschaft ein.*

Vakuolen und Zellsaft. Vakuolen sind Zellbestandteile, denen besonders bei Pflanzen große Bedeutung zukommt. Der Zellsaft in den Vakuolen kann neben Wasser gelöste Salze, Säuren, Zucker, Farbstoffe (■ Anthozyane), Gerbstoffe, Alkaloide oder wasserlösliche Vitamine enthalten.

Vakuolen können auf die Stoffspeicherung spezialisiert sein.

■ Speicherung von Eiweißen in den Zellen von Hülsenfruchtsamen und Getreidekörnern; Speicherung von Öl in Zellen von Raps- und Mohnsamen.

Bei Pflanzen nimmt der Zellsaft einen Teil der aus dem Protoplasma ausgeschiedenen Stoffwechselprodukte auf, die sonst schädigend auf die Lebensvorgänge wirken können. Gleichzeitig bilden die zellsaftgefüllten Vakuolen im Zusammenwirken mit den Zellwänden einen wichtigen Teil des mechanischen Systems, das den Pflanzen Standfestigkeit verleiht (↗ Turgordruck, S. 22).

Die Zellen vieler Protozoen enthalten spezialisierte Nahrungsvakuolen, die sich um aufgenommene Nahrungsteilchen bilden. Die in den Nahrungsvakuolen enthaltenen Enzyme bewirken die Verdauung der aufgenommenen Stoffe. Die Verdauungsprodukte können dann in das Zellplasma aufgenommen und dort weiter umgewandelt werden. Auch in den Zellen höherer Tiere kommen Vakuolen vor, in denen sich bis zu 40 verschiedene Enzyme befinden, die den Abbau hochmolekularer Verbindungen durchführen, die in diese Zellbestandteile aufgenommen werden können.

▶ Zellen sind die Grundbausteine aller Lebewesen. An ihre spezifischen Strukturen sind die Leistungen des Stoffwechsels gebunden; Zellen sind Struktur- und Funktionseinheiten. Die Aufgliederung der Zelle in verschiedene Reaktionsräume stellt ein wichtiges Element der räumlichen und zeitlichen Ordnung dar, die für Lebensvorgänge typisch ist.

Das Grundplasma ist Ort zahlreicher biochemischer Stoffwechselreaktionen. Die Plasmaströmung, die Brownsche Bewegung und die Änderungen des kolloidalen Zustandes bewirken ständige Veränderungen im Grundplasma. Das Grundplasma bildet ein dynamisches System, in das die übrigen Protoplasmabestandteile eingelagert sind.

Der Zellkern enthält mit der DNS den wichtigsten Informationsspeicher für die Erbinformation und die Regulation der Lebensprozesse in der Zelle.

Chloroplasten sind die Orte der Energieumsetzungen und des Stoffgewinns bei der Photosynthese.

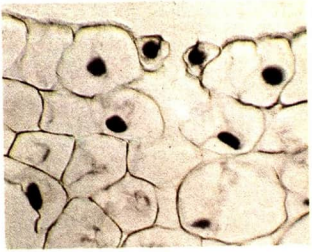
Mitochondrien sind die Orte des Energieumsatzes bei der Atmung.

Die Biosynthese der Eiweiße, die die Grundsubstanz des Protoplasmas darstellen, erfolgt an den Ribosomen.

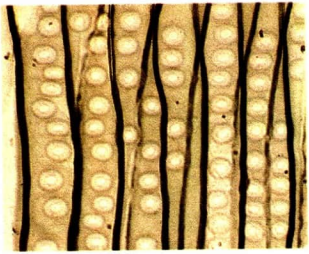
Biomembranen bilden die Grundlage für die strukturelle Begrenzung einzelner Zellbestandteile und die Aufgliederung der Zelle in einzelne Reaktionsräume.

Pflanzenzellen sind von einer zellulosehaltigen Zellwand umgeben, die zusammen mit den zellsafthaltigen Vakuolen die Grundlage für das mechanische Festigungssystem bilden.

Stoffaustausch



Spaltöffnung mit Schließzellen (1000 : 1)



Tüpfel in verholzter Sproßachse (800 : 1)

Der Stoffaustausch ist ein wesentliches Element der Beziehungen zwischen Lebewesen und Umwelt. Er umfaßt Stoffaufnahme und Stoffabgabe (■ Aufnahme von Nährstoffen in gelöster oder fester Form, Abgabe von Wasserdampf). ①

Aber auch innerhalb der Lebewesen finden ständig Austauschvorgänge statt: zwischen benachbarten Zellen, zwischen Elementen des Ferntransportes (■ Blutgefäße, Lymphgefäße, Gefäße und Siebröhren der Leitbündel, Interzellularen) und den angrenzenden Zellen sowie innerhalb der Zellen zwischen membranumhüllten Organellen und Zellplasma.

▶ *Stoffaustausch ist ein wichtiges Element sowohl des Kontaktes zwischen Lebewesen und Umwelt als auch der Lebensvorgänge innerhalb der Organismen.*

Die Zellen bilden die strukturelle und funktionelle Grundlage der Austauschvorgänge. ②

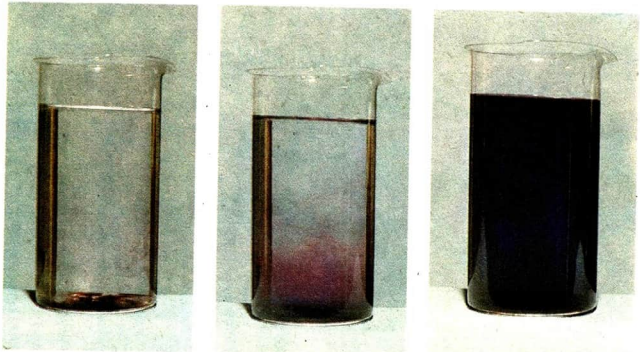
Bei der Stoffaufnahme und -abgabe innerhalb der Zelle wirken die Membransysteme in der Zelle als Transportbarrieren zwischen den einzelnen Bestandteilen des Zytoplasmas, für deren Überwindung Energie aufgewendet werden muß. Die erforderliche Energie kann durch physikalische Prozesse (■ thermische Energie, elektrische Energie) oder durch biologische Prozesse geliefert werden (■ Atmungsenergie).

Stoffbewegungen beim Stoffaustausch zwischen den Zellen beruhen zum Teil auf physikalischen Vorgängen; zum Teil hängen diese Stoffbewegungen von der Energiebereitstellung durch biologische Prozesse ab.

① Nennen Sie mindestens zwei Beispiele für biologische Prozesse, für die der Austausch gasförmiger Stoffe zwischen Lebewesen und Umwelt Voraussetzung ist!

② Erläutern Sie, aufgrund welcher Eigenschaften Biomembranen die Zellen beziehungsweise die Zellorganellen gegen die Umgebung abgrenzen und andererseits den Stoffaustausch zwischen ihnen und der Umgebung ermöglichen können!

Diffusion und Osmose als physikalische Prozesse des Stoffaustausches der Zellen



Experiment zur Beobachtung der Diffusion: Lösung von Kaliumpermanganatkristallen in Wasser (links, nach 1 Minute); fortschreitender Konzentrationsausgleich (Mitte, nach 20 Minuten); beendeter Konzentrationsausgleich (rechts, nach 24 Stunden)

Physikalische Prozesse beim Austausch von Stoffen zwischen den einzelnen Räumen innerhalb einer Zelle sowie zwischen Zelle und Umwelt beruhen auf Diffusion und Osmose.

► *Diffusion ist die Verteilung freibeweglicher Teilchen von aneinandergrenzenden Flüssigkeiten und Gasen auf Grund der Eigenbewegung der Teilchen.*

Die Diffusion bewirkt den Konzentrationsausgleich zwischen den Stoffen.

Die physikalische Ursache für die Stoffbewegung bei der Diffusion ist die Wärmezufuhr zu allen Teilchen aus der Umgebung, die thermische Energie. Die erzeugte Bewegung der Einzelteilchen ist ungerichtet, jedoch wird durch die größere Teilchendichte am Ort der höheren Konzentration des betreffenden Stoffes (■ Rohrzuckermoleküle in stark konzentrierter Lösung) eine größere Häufigkeit bewegungshemmender Teilchenzusammenstöße bewirkt als am Ort der geringeren Teilchendichte (■ in schwach konzentrierter Zuckerlösung), das führt im Durchschnitt aller Teilchen eines Stoffes zur Bewegung in den Raum der geringeren Teilchendichte. Ist der Konzentrationsausgleich erreicht, läßt sich keine gerichtete Bewegung im Teilchendurchschnitt mehr feststellen. ① ②

Diffusion findet nicht nur zwischen gasförmigen und flüssigen, sondern auch zwischen festen Stoffen statt, sie ist dort aber außerordentlich langsam.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Konzentrationsausgleich erreicht wird, hängt unter anderem vom Konzentrationsunterschied und von der Temperatur ab. Berührungsquerschnitt und Diffusionsstrecke beeinflussen ebenfalls die Diffusionsgeschwindigkeit. ③

Befindet sich zwischen unterschiedlich konzentrierten Lösungen oder Gasen eine poröse Trennwand, so erfolgt die Diffusion durch die Poren der Wand hindurch. Setzen die Poren dem Teilchendurchtritt keinen Widerstand entgegen, ist die Wand durchlässig, permeabel

(■ Zellwand). Können nur Moleküle geringer Größe die Poren passieren, größere Moleküle jedoch nicht, so ist die Wand halbdurchlässig, semipermeabel (■ Zellmembranen).

Die Diffusion durch halbdurchlässige Membranen, die Osmose, ist beim Stoffaustausch in biologischen Systemen von besonderer Bedeutung.

▶ *Osmose ist die einseitig behinderte Diffusion durch eine halbdurchlässige Membran.*

Bei osmotischem Stoffaustausch können durch die halbdurchlässige Membran im Idealfall nur die Moleküle des Lösungsmittels diffundieren, ein Transport der Moleküle des gelösten Stoffes ist nicht möglich.

■ Sind in einem System Rohrzuckerlösung und Wasser durch eine halbdurchlässige Membran voneinander getrennt, dann können die Zuckermoleküle auf Grund ihrer Größe nicht aus der Zuckerlösung in das Wasser gelangen; die Wassermoleküle diffundieren vom Ort ihrer größeren Konzentration schneller durch die Membran in die Zuckerlösung, dem Ort der geringeren Lösungsmittelkonzentration, als in umgekehrter Richtung, so daß es zu einer Volumenzunahme auf der Seite der Zuckerlösung kommt.

In geschlossenen Systemen wird bei osmotischem Stoffaustausch die Volumenänderung als Druckveränderung meßbar; sie kann mit einem Osmometer gemessen werden.

Die Druckzunahme auf der einen Seite des Systems kann nur so lange erfolgen, bis von außen wirkende Kräfte (■ Konzentrationsänderung, Druck der begrenzenden Wände) sie kompensiert.

■ In dem von dem bedeutenden deutschen Pflanzenphysiologen Wilhelm PFEFFER (1845 bis 1920) entwickelten Osmometer befindet sich die Versuchslösung in einem Gefäß aus ungebranntem Ton (heute wird häufig ein Glasfiltertiegel verwendet), dessen Poren durch den schwerlöslichen Niederschlag von Kupferhexazyanoferrat (II), $Cu_2[Fe(CN)_6]$, verschlossen worden sind. Dieser Niederschlag bildet in den Poren eine semipermeable Membran. Das Gefäß wird oben durch einen durchbohrten Stopfen mit einem Manometerrohr verschlossen und in ein Gefäß mit Wasser als Lösungsmittel getaucht. Die Volumenzunahme der Lösung im Tiegel wird am Anstieg der Quecksilbersäule im Manometerrohr als osmotischer Druck abgelesen. Für Demonstrationsversuche läßt sich auch eine entfettete Schweinsblase als semipermeable Membran verwenden.

▶ *Der osmotische Druck ist ein Maß für die Intensität, mit der eine konzentrierte Lösung durch eine halbdurchlässige Membran hindurch Moleküle des Lösungsmittels aufnehmen kann. Er wird in Pascal gemessen.*

Bei Pflanzen wird der osmotische Druck als Saugkraft der Zelle wirksam.

Die Größe des osmotischen Druckes ist nicht von der Art der gelösten Teilchen, sondern ausschließlich von der je Volumeneinheit vorhandenen Anzahl der gelösten Teilchen, der Konzentration, abhängig. ④⑤

① Beschreiben Sie das Verhalten von Rohrzuckermolekülen bei der Überschichtung einer rohrzuckerhaltigen mit einer rohrzuckerfreien Lösung! Begründen Sie den Vorgang!

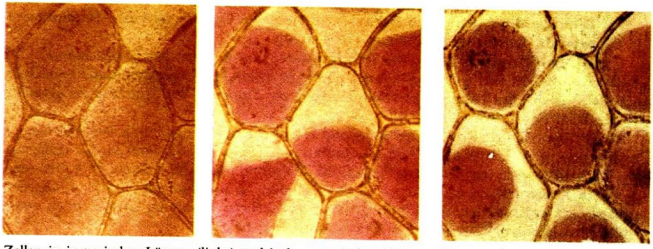
② Begründen Sie, warum sich nach Konzentrationsausgleich durch Diffusion zwischen zwei Lösungen im Durchschnitt der Teilchen keine Bewegungsrichtung mehr feststellen läßt! Erklären Sie das Verhalten der einzelnen Teilchen!

③ Erläutern Sie, warum Temperaturerhöhung die Diffusionsgeschwindigkeit steigert, während Temperatursenkung die Diffusionsgeschwindigkeit herabsetzt!

④ Erläutern Sie, warum der osmotische Druck nur von der Konzentration der Lösung abhängt, nicht aber von der Art der gelösten Teilchen!

⑤ Erläutern Sie den Unterschied im osmotischen Druck, der von einer 1molaren Natriumchloridlösung (dissoziierendes Salz) im Vergleich zu einer 1molaren Rohrzuckerlösung ausgeübt werden kann!

Die Zellen der Lebewesen als osmotische Systeme



Zellen in isotonischer Lösung (links) und in hypertonischer Lösung (Mitte: nach 5 min; rechts: nach 10 min)

Pflanzenzellen enthalten in ihren Vakuolen Zellsaft, das heißt wäßrige Lösungen von Salzen und niedermolekularen organischen Verbindungen (■ Monosaccharide, organische Säuren, lösliche Farbstoffe). Der Tonoplast, das umgebende Zellplasma und das Plasmalemma wirken als semipermeable Membranen. Die Zellwand, welche die Pflanzenzellen außen umgibt, ist voll permeabel. In der Umgebung der Zelle befindet sich ebenfalls eine wäßrige Lösung niedermolekularer anorganischer und organischer Verbindungen (■ Bodenlösung, Leitbündelinhalt). Die Bewegung der Moleküle des Lösungsmittels Wasser zwischen Zelle und Umgebung hängt von den Konzentrationsverhältnissen zwischen Zellsaft und Außenlösung ab. Besitzt der Zellsaft eine höhere Konzentration als die Außenlösung (hypertonischer Zellsaft, hypotonische Außenlösung), so dringen Wassermoleküle vom Ort ihrer höheren Konzentration (Außenlösung) in die Zelle ein, da die Moleküle der gelösten Stoffe die semipermeable Membran nicht durchdringen können; Wasser diffundiert in die Vakuole und das Volumen an Zellsaft nimmt so lange zu, bis nach Möglichkeit Zellsaft und Außenlösung gleiche Konzentrationen aufweisen, das heißt isotonisch sind. Die Vakuole kann sich allerdings nur so lange ausdehnen, bis die Zellwand, die in gewissen Grenzen elastisch dehnbar ist, einen Gegendruck ausübt, der dem Innendruck der Vakuole, dem Turgordruck, gleicht.

► *Der Turgordruck ist der Druck, den der Zellsaft gegen die Zellwand ausübt; er ist der Innendruck der Zelle.*

Der Turgordruck ist eine Folge des osmotischen Druckes des Zellsaftes.

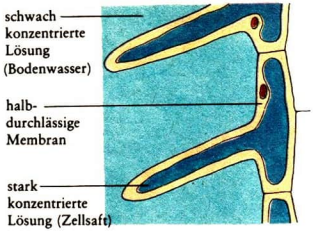
► *Der Wanddruck ist der Druck, den die Zellwand dem Turgordruck entgegensetzt.*

Die Wechselbeziehung zwischen Turgordruck und Wanddruck bildet eine wichtige Grundlage für die Gewebefestigkeit in Pflanzen. ①

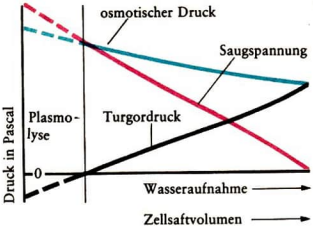
Der osmotische Druck des Zellsafts bewirkt solange eine Wasseraufnahme in die Zelle, wie die Differenz zwischen ihm und dem Wanddruck einen positiven Wert aufweist. Diese Differenz bildet die Saugspannung der Zelle. Kompensiert der Wanddruck den osmotischen Druck, wird die Saugspannung gleich Null. ②

► *Die Saugspannung ist ein Maß für das Wasseraufnahmevermögen der Zelle.*

Besitzt der Zellsaft eine niedrigere Konzentration als die Außenlösung, diffundieren Moleküle des Lösungsmittels Wasser aus der Vakuole — dem Ort ihrer höheren Konzentration — nach außen. Der Turgordruck vermindert sich, bis die Zellwand sich völlig entspannt hat. Bei weiterem Wasseraustritt aus der Vakuole verringert sich deren Volumen derart, daß sich das umgebende Plasma von der Zellwand abhebt und die Zelle plasmolysiert.



Wurzelhaarzelle als osmotisches System



Druckverhältnisse in einer Pflanzenzelle

▶ *Plasmolyse ist das Schrumpfen und Ablösen des Protoplasmas von der Zellwand durch osmotischen Wasseraustritt aus der Vakuole in hypertonischer Außenlösung.* ③④

Überträgt man eine derart plasmolysierte Zelle in eine hypotonische Lösung, so können Wassermoleküle aus der stark wasserhaltigen Außenlösung wieder in die Zelle eindringen, bis die Deplasmolyse erreicht ist.

▶ *Deplasmolyse ist die Zunahme des Zellinhaltsvolumens durch osmotische Wasseraufnahme in die Vakuole bei hypotonischer Außenlösung.* ⑤

Die Eigenschaft der Semipermeabilität ist an die Membranen und das Plasma lebender Zellen gebunden.

Werden die Zellen vor Durchführung eines Plasmolyseexperiments (↑ Abb. Seite 22) durch Erhitzen abgetötet, so reagieren die Zellen nicht mehr durch Ablösung des Protoplasmas von der Zellwand auf die Einbettung in eine hypertonische Lösung. Enthalten die Zellen Zellsaft, so diffundiert dieser aus den Vakuolen und dem Gewebe heraus.

Bei tierischen Organismen sind in der Regel keine Zellsaftvakuolen ausgebildet; eine Ausnahme bilden einige Vertreter der Einzeller (■ Wimpertierchen), bei denen pulsierende Vakuolen den Wasserhaushalt der Zelle regeln. In Zellen tierischer Organismen werden osmotische Vorgänge vom Wassergehalt des Protoplasmas und den darin enthaltenen Ionen und niedermolekularen organischen Verbindungen verursacht. Das gleiche gilt auch für junge teilungsfähige Pflanzenzellen, die arm an oder frei von Vakuolen und Zellsaft sind.

Obwohl Osmose in Zellen und Geweben vor allem zum Austausch von Wassermolekülen führt, sind die natürlichen Diffusionsbarrieren des Protoplasmas, die Membranen, keinesfalls ideal semipermeabel. Sie lassen auch den Durchtritt gelöster Salze und niedermolekularer organischer Verbindungen zu, jedoch ist die Austauschgeschwindigkeit für diese Stoffe viel geringer als für Wasser.

① Erläutern Sie die Bedeutung von Turgordruck und Wanddruck als Mittel zur Festigung von Pflanzengeweben!

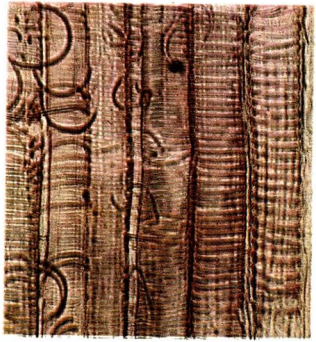
② Erklären Sie, warum Turgordruck und Wanddruck in der Regel in Pflanzenzellen gleich groß sind!

③ Welche äußeren Bedingungen können bei einer lebenden Zelle zu negativer Saugspannung führen? Welche Folgen ergeben sich daraus für die Zelle? Ziehen Sie Schlußfolgerungen für die gärtnerische und landwirtschaftliche Produktion!

④ Erläutern Sie die Erscheinung des Welkens von Pflanzen oder Pflanzenteilen!

⑤ Erklären Sie die Erscheinung, daß nach anhaltendem Regen fleischige Früchte leicht aufplatzen!

Wasser- und Nährstoffaufnahme bei Pflanzen; Stofftransport



Tracheen, längs (500 : 1)

Nachweis der Wasserleitung in Pflanzen

Atmung, Photosynthese und Transpiration sind mit einem Austausch gasförmiger Stoffe an den freiliegenden oder ins Körperinnere verlagerten Zelloberflächen verbunden. Die Diffusionsgeschwindigkeit gasförmiger Stoffe genügt auch für deren Transport über Entfernungen, die über die Dimensionen einer Zelle hinausgehen. Die Diffusionsgeschwindigkeit gelöster Stoffe ist dagegen so gering, daß sie für den Ferntransport von Stoffen in Organismen zur Aufrechterhaltung von Lebensprozessen nicht genügt.

In den Körpern größerer vielzelliger Lebewesen sind besondere Gewebe für den Langstreckentransport von Flüssigkeiten (■ Leitbündel, Gefäße der Wirbeltiere) ausgebildet.

Neben den Siebzellen und Gefäßzellen bilden bei Pflanzen die Zellwände und das durch die Zellwände hindurch untereinander verbundene Protoplasma der Zellen Wege für den Transport von Stoffen. Diese Wege sind besonders bei Stoffaustausch zwischen Leitbündeln und angrenzenden Geweben sowie zwischen Geweben und Umwelt des Organismus von Bedeutung. ①

Im Kontakt einer Wurzelzelle mit dem Boden gelangt das Bodenwasser mit den darin gelösten Stoffen zunächst durch Diffusion bis in die Zellwände. Durch Osmose wird das Wasser in die Wurzelzellen aufgenommen, wenn die Saugspannung der Zellen größer ist als das Wasserbindevermögen der Bodenteilchen. Aus den Wurzelzellen gelangt das Wasser infolge des Transpirationssoges in die Gefäße. ②

In den Gefäßen ist die Kohäsion zwischen den Wassermolekülen so groß, daß die Adhäsion zu den Gefäßwänden überwunden wird und der unter Transpirationssog stehende Wasserfaden nicht abreißt.

In den Blättern tritt Wasser aus den Gefäßen durch osmotische Prozesse in die Zellen über, die den Gefäßen anliegen, und wird durch Diffusion und Osmose von Zelle zu Zelle weiterbewegt, bis es an der Blatt- oder Interzellularenoberfläche verdunstet.

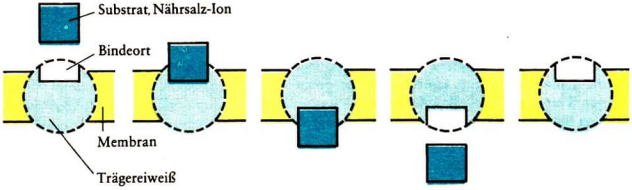
► *Wasseraufnahme, Wassertransport und Wasserabgabe in Pflanzen folgen vor allem dem Konzentrationsgefälle des Lösungsmittels Wasser. Sie beruhen auf den physikalischen Vorgängen Diffusion und Osmose.*

Die Nährsalze aus dem Boden werden von den Pflanzen nur in dissoziierter Form, als Ionen, aufgenommen.

Für die Ionen gelöster Salze sind die Biomembranen der Zellen weitgehend undurchlässig, impermeabel. Die Nährsalz-Ionen können also nicht einfach vom Wasserstrom mittransportiert werden. Sie müssen von den Wurzeln der Pflanzen entgegen dem Konzentrationsgefälle der gelösten Stoffe aufgenommen werden, da in der Regel im Zellsaft die Anzahl der Moleküle des gelösten Stoffes größer ist als im Bodenwasser. Aufnahme und Transport der Nährsalz-Ionen sind nur unter Energieaufwand möglich. Die erforderliche Energie wird aus dem Stoffwechsel der Zellen (Atmung, Gärung) bereitgestellt. ③

► *Die Aufnahme von Ionen und anderen Nährstoffen ist ein energiebindender Prozeß und erfolgt durch aktiven Transport. Wasser wird dagegen passiv durch Diffusions- und Osmosevorgänge bewegt.*

Der aktive Transport der Nährsalz-Ionen geschieht über besondere Eiweiß-Makromoleküle der Membranen, an die der aufzunehmende Stoff gebunden wird, ehe er die Membran in dieser Verbindung passiert, und von denen er anschließend wieder freigesetzt wird. Die als Transportmittel fungierenden Eiweiße, die Träger, können jeweils nur bestimmte Nährsalz-Ionen binden. Sie bilden deshalb die Grundlage dafür, daß die Pflanzen gegenüber den Nährsalzen des Bodens ein Auswahlvermögen haben.



Schematische Darstellung des trägervermittelten Transports durch Biomembranen

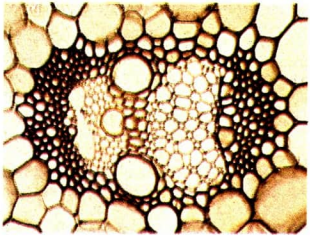
Die Leitbündel der Pflanzen enthalten hauptsächlich zwei unterschiedlich gebaute Elemente — die Gefäße und die Siebröhren —, deren Funktionen sich ebenfalls sowohl in bezug auf die vorherrschende Transportrichtung als auch hinsichtlich der transportierten Stoffe unterscheiden. ④

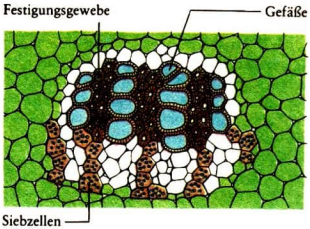
① Vergleichen Sie bei benachbarten Zellen, die untereinander kommunizieren, das zusammenhängende Protoplasmasystem, die Zellwände und die Elemente der Leitbündel hinsichtlich der Transporthindernisse und ihrer damit zusammenhängenden Bedeutung für den Langstreckentransport von gelösten Stoffen in den Pflanzen!

② Definieren Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus der Klasse 9 den Begriff Transpirationssog! Informieren Sie sich dazu auch in Bio i Ü, Seite 197!

③ Begründen Sie aus den Grundsätzen der Wärmelehre die Tatsache, daß die Aufnahme von Nährsalz-Ionen ein energiebindender Prozeß ist. Vergleichen Sie dazu auch Physik in Übersichten!

④ Zeigen Sie in den Leitbündeln der Abbildungen Seite 26 die Gefäße und die Siebröhren! Erläutern Sie den unterschiedlichen Bau beider Elemente! Benutzen Sie dazu auch Wissensspeicher Biologie, Seite 154!





Querschnitt durch ein Leitbündel (700 : 1); rechts schematische Darstellung

Ionen (■ Nitrate) und in den Wurzeln synthetisierte Verbindungen (■ Aminosäuren) werden hauptsächlich in den Gefäßen mit dem Transpirationsstrom in der Sproßachse aufwärts bewegt. In den Siebröhren werden dagegen vor allem Assimilate befördert, die in den Blättern synthetisiert worden sind und zu den Orten des Assimilatbedarfs (■ Wurzeln, Samen, Knollen) gelangen müssen. In den Siebröhren herrscht die abwärts gerichtete Stoffbewegung vor.

Wichtigste Verbindungen, die in Siebröhren transportiert werden, sind Rohrzucker und Aminosäuren. Die Aufnahme der Assimilate in die Zellen der Siebröhren und ihre Abgabe an die Zellen, für deren Stoffwechsel sie gebraucht werden, geschehen vermutlich durch aktiven Transport. Zwischen dem Ort des Assimilatverbrauches und dem Ort der Assimilatbildung bestehen in der Regel Konzentrationsgefälle in Richtung des Verbrauchsortes. Diese Konzentrationsgefälle tragen zur Assimilatbewegung in den Pflanzen bei.

Osmose ist die Diffusion von Stoffen durch semipermeable Wände. Sie bewirkt die Wasseraufnahme in lebenden Zellen.

Das Maß für die Intensität, mit der eine Lösung durch eine halbdurchlässige Wand Lösungsmittel aufnehmen kann, ist der osmotische Druck. Er wird als Konzentration (mol/Liter) oder in Pascal ausgedrückt.

Der Zellinnendruck, Turgordruck, ist die Folge osmotischer Wasseraufnahme in Zellen. Er wird in Pflanzenzellen durch den Wanddruck kompensiert.

Die Wechselbeziehung zwischen Turgordruck und Wanddruck bildet eine wichtige Grundlage für die Gewebefestigung in Pflanzen.

Eine positive Differenz zwischen osmotischem Druck und Turgordruck (gleich Wanddruck) bewirkt die Saugspannung der Zellen und ist die Grundlage für die Wasseraufnahme in Pflanzenzellen.

Wasseraufnahme, -bewegung und -abgabe beruhen auf passiver Stoffbewegung durch Diffusion und Osmose.

Die Aufnahme und Abgabe von Ionen und anderen gelösten Stoffen erfolgt durch aktiven Transport mit Hilfe von Trägermolekülen. Aktiver Transport ist energiebindend. Die erforderliche Energie wird durch Stoffwechselprozesse freigesetzt.

Stoffwechselphysiologie

Otto WARBURG mit Karl LOHMANN sowie Melvin CALVIN, bedeutende Biochemiker des 20. Jahrhunderts

Leben stellt eine der Daseinsformen der Materie dar. Ebenso wie unbelebte Materie sind Lebewesen aus Atomen und Molekülen aufgebaut, unter denen organische Kohlenstoffverbindungen vorherrschen. Bestimmend für die Existenz lebender Strukturen ist der ständige Prozeß von Synthese, Umwandlung und Abbau dieser Verbindungen. Dabei gelten auch für Lebewesen sowohl die Gesetze der Chemie (■ Gesetz von der Erhaltung der Masse, Massenwirkungsgesetz) als auch die Gesetze der Physik (■ Erster und Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). In der Gültigkeit chemischer und physikalischer Gesetze für chemische und physikalische Vorgänge in Lebewesen drückt sich die Einheit der materiellen Welt aus.

Darüber hinaus weisen Lebewesen besondere Eigenschaften und Funktionen auf, für die spezielle biologische Gesetzmäßigkeiten gelten.

► *Lebewesen weisen eine strukturelle Ordnung auf, die sich auf der Ebene des Gesamtorganismus ebenso nachweisen läßt wie auf der Ebene des makromolekularen Aufbaus.*

Diese Struktur ist nicht konstant, sondern sie kann sich während des Wachstums und der Entwicklung jedes Individuums wie auch während bestimmter Stoffwechselvorgänge in der Zelle in geordneter Weise verändern.

Die räumliche Ordnung der Makromoleküle in den Zellen ist gleichzeitig die Grundlage für die zeitliche Ordnung in den Lebensvorgängen.

■ Sind unterschiedliche Enzyme in der Reihenfolge A, B und C angeordnet, so beginnen die von den Enzymen katalysierten Reaktionen I, II und III mit I an Enzym A, werden räumlich daneben und zeitlich danach mit II an B fortgesetzt und enden schließlich mit III an Enzym C.

Das Erkennen der dialektischen Einheit von räumlicher und zeitlicher Ordnung ist für das Verständnis von Lebensvorgängen (■ Umwandlung von Stoffen) notwendig.

Stoffwechsel als grundlegende Lebensfunktion

Entwicklungsstadien von keimenden Samen der Garten-Bohne

Ein Lebewesen, das wächst, nimmt deutlich an Masse zu, die dazu benötigten Stoffe nimmt es aus seiner Umgebung auf. Die Zusammensetzung der aufgenommenen Verbindungen entspricht in den wenigsten Fällen genau dem Bedarf des Lebewesens. Erst durch eine Stoffumwandlung, die sich in seinen Zellen vollzieht, werden körpereigene Stoffe gebildet, wobei im Ergebnis der stofflichen Anpassung nicht verwertbare Substanzen auftreten, die meist aus dem Körper wieder abgegeben werden.

Auch nicht wachsende Lebewesen verändern durch Stoffwechsel ihre Masse.

■ Lufttrockene Samen nehmen Sauerstoff auf und geben Kohlendioxid bei der Atmung ab; dabei verlieren sie langsam an Masse, da sameneigene Stoffe oxydiert werden. Keimen die Samen, wobei sich ihre Lebensprozesse durch Wasseraufnahme beschleunigen, dann verstärkt sich die Trockenmasseabnahme, bis die Keimpflanze sich so weit entwickelt hat, daß sie zu eigenen Syntheseleistungen fähig ist und körperfremde Stoffe aufnehmen und in körpereigene Verbindungen umwandeln kann. ①

► *Stoffwechsel ist die Gesamtheit der Stoffaufnahme-, Stoffumwandlungs- und Stoffabgabevorgänge der Lebewesen.*

Ob in einem Organismus die Prozesse, die zum Aufbau körpereigener Stoffe führen, oder Prozesse des Stoffabbaus überwiegen, hängt sowohl vom jeweiligen Stadium der Individualentwicklung (■ Wachstumsphase, Altern) ab als auch von der Intensität, mit der der betreffende Organismus auf Umwelteinwirkungen reagiert (■ durch Bewegung, durch Winterschlaf).

Die Erhaltung des lebenden Zustandes ist nur durch Energieaufwand möglich, da die komplizierten räumlich geordneten Strukturen und Funktionen des Protoplasmas ständig zum Zerfall neigen. Diese lebensnotwendige Energie wird durch bestimmte abbauende Prozesse im Verlauf des Stoffwechsels freigesetzt.

► *Stoffwechselvorgänge sind immer mit energetischen Prozessen verbunden.* ②

Ein wachsendes Lebewesen nimmt mehr Stoffe aus seiner Umwelt auf als seinem Massegewinn entspricht. Der Differenzbetrag an Stoffen wird schrittweise abgebaut. Die dabei freigesetzte Energie dient zum Teil der Erhaltung des bereits bestehenden Körperzustandes, zum Teil wird sie in Vorgängen, die zum Substanzzuwachs und damit zum Wachstum führen, gebunden.

Der Stoffwechsel in den Zellen kann nur in ständigem Stoffaustausch mit der Umwelt (■ Nachbarzelle, Interzellulare, Außenumwelt) erfolgen. Zu den ausgetauschten Stoffen gehören in wäßriger Lösung vorliegende Stoffe (■ Kohlenhydrate, Salze) und Gase (■ Sauerstoff, Kohlendioxid).

▶ *Durch Stoff- und Energieaufnahme- und -abgabeprozesse sind die Zellen ständig mit ihrer Umwelt verbunden. Sie bilden Systeme, die gegenüber der Umwelt weitgehend offen sind und im Gleichgewicht von Aufnahme, Umwandlung und Abgabe von Stoffen und Energie existieren.*

In diesem Fließgleichgewicht bedingen sich dissimilatorische, energiefreisetzende Prozesse einerseits und energiebindende, assimilatorische Vorgänge andererseits wechselseitig. Sie stellen zwei notwendige widersprüchliche Seiten des einheitlichen Stoffwechsels der Lebewesen dar.③

Der Stoffwechsel der Zelle besteht aus einer Vielzahl von chemischen Reaktionen, deren zeitlich und räumlich geordnete Abfolge vom Feinbau der Zelle bestimmt wird und auf die bestimmte Biokatalysatoren regulierend einwirken.④

Traubenzucker und Sauerstoff reagieren bei normalem Druck und 36 °C in wäßriger Lösung im Reagenzglas so unendlich langsam, daß die Stoffumwandlung praktisch nicht festzustellen ist. Lebewesen verfügen über Biokatalysatoren, die Enzyme, die eine rasche Oxydation des Traubenzuckers unter den in ihren Zellen herrschenden Bedingungen ermöglichen.

■ Entsprechende Enzyme setzen bei der Oxydation von Traubenzucker die für die Aktivierung notwendige Energie so weit herab, daß der Oxydationsvorgang unter den Bedingungen der Zelle (■ Druck, Temperatur) ablaufen kann.⑤⑥

▶ *Enzyme sind Biokatalysatoren, die auf Stoffwechselreaktionen in der Zelle einwirken; sie gehören zur Stoffgruppe der Eiweiße.*

Enzyme bestehen aus einem Eiweiß, dem Apoenzym, das die Trägersubstanz darstellt, und in der Regel aus einer nicht zu den Eiweißen gehörenden Wirkgruppe, dem Koenzym. Beide Stoffe können nur zusammen ihre katalytische Wirkung ausüben. Die Trägersubstanz bindet an einer bestimmten Stelle das Koenzym und an einer anderen, durch seine molekulare Feinstruktur gegebenen Stelle nach dem Schlüssel-Schloß-Prinzip auch das Substrat der Reaktion.

▶ *Die Herstellung des Enzym-Substrat-Komplexes ist entscheidend für die Herabsetzung der Aktivierungsenergie.*

Die Partner im Enzym-Substrat-Komplex bilden eine Zwischenverbindung, bei der durch feine Änderungen im Molekülgefüge die Aktivierungsenergie erniedrigt wird, so daß die Reaktion ablaufen und die stoffliche Veränderung am Substrat-Molekül vollzogen werden kann.⑦⑧

① Begründen Sie die Aussage, daß sich durch Wasseraufnahme in keimenden Samen die Lebensvorgänge beschleunigen!

② Begründen Sie die Aussage, daß Stoffwechselvorgänge immer mit energetischen Prozessen verbunden sind! Wenden Sie Ihre Kenntnisse über die Aufnahme von Stoffen sowie über den Stofftransport in Organismen an!

③ Formulieren Sie Ihre Kenntnisse über den Begriff Stoffwechsel!

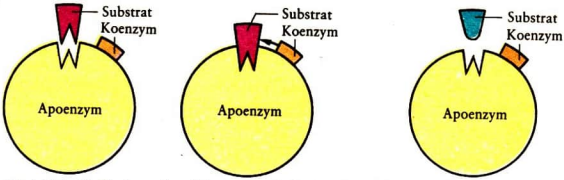
④ Stellen Sie wesentliche Kennzeichen von Stoffwechselvorgängen in Lebewesen zusammen! Verwenden Sie dazu auch Bio i Ü, Seite 187!

⑤ Erläutern Sie die Begriffe „Katalyse" und „Katalysator"! Verwenden Sie dazu Wissensspeicher Chemie, Seite 72, 73!

⑥ Stellen Sie fest, ob in dem angeführten Beispiel positive oder negative Katalyse stattfindet! Begründen Sie Ihr Ergebnis!

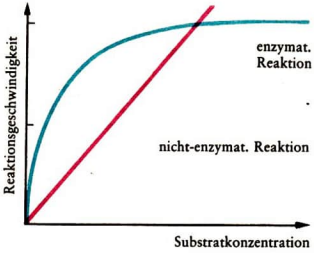
⑦ Erläutern Sie den Begriff Aktivierung!

⑧ Erläutern Sie die Wirkung eines Biokatalysators!

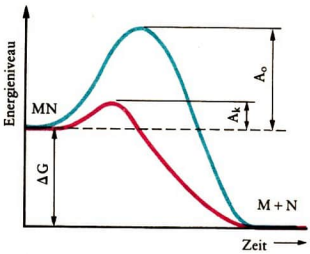


Modell für die Bindung eines Substrats an ein Enzym. Das Substrat muß zum Enzym „passen" wie der Schlüssel zum Schloß (links), ein nicht „passendes" Substrat (rechts) wird nicht umgesetzt

Nachdem die Stoffumwandlung am Substrat vollzogen worden ist, löst sich das Reaktionsprodukt aus der Verbindung mit dem Enzym, das danach erneut für die Umwandlung eines weiteren Substratmoleküls zur Verfügung steht. Eine geringe Anzahl von Enzymmolekülen ist bei großer Reaktionsbeschleunigung in der Lage, eine Vielzahl von Substratmolekülen katalytisch umzuwandeln. ①



Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit bei enzymatischen Reaktionen vom Verhältnis Substrat- und Enzymkonzentration. Als Vergleich ist die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Substratkonzentration bei nichtenzymatischen Reaktionen dargestellt.



Erniedrigung der Aktivierungsenergie durch einen Katalysator am Beispiel der chemischen Reaktion MN→M + N (Spaltung des Substrats MN in die Produkte M und N). A_o = Aktivierungsenergie ohne Katalysator, A_k = Aktivierungsenergie mit Katalysator, ΔG = Unterschied im Energieniveau zwischen MN und M + N

Enzyme sind weitgehend spezialisierte Katalysatoren. Ihre Spezialisierung erstreckt sich sowohl auf die Art des umzuwandelnden Substrates (Substratspezifität) als auch auf die Art der zu vollziehenden Umwandlung (Reaktionsspezifität). Häufig ist das Apoenzym für die Substratspezifität verantwortlich, während das Koenzym Träger der Reaktionsspezifität ist.

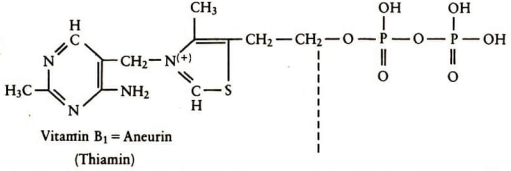
- Das Enzym Amylase spaltet Amylose, einen Hauptbestandteil der Stärke, hydrolytisch in Maltosemoleküle (Malzzucker). Das Enzym ist auf Amylose als Substrat spezialisiert und auf Hydrolyse als Reaktion.
- Das Enzym Maltase spaltet Maltose hydrolytisch in Glukose. Das Enzym ist auf Maltose als Substrat spezialisiert und führt eine hydrolytische Reaktion aus. ②

Amylase und Maltase werden bei der Bierbrauerei zum Abbau von Gerstenstärke zur Herstellung von Malz und beim Gärungsprozeß benutzt.

Die Namen der Enzyme enden in der Regel auf „ase". Die vorgesetzten Bezeichnungen geben entweder das entsprechende zu verändernde Substrat an (■ bei Amylase = Amylose, bei Maltase = Maltose) oder die für das Enzym spezifische Reaktion (■ bei Oxydoreduktasen = Redoxreaktionen, bei Hydrolasen = Hydrolysen, bei Transferasen = Gruppenübertragungen). Einige wenige, schon sehr lange bekannte Enzyme, werden nicht nach diesem Schema benannt (■ Pepsin, Trypsin).

Eine Reihe von Koenzymen ähneln in ihrem chemischen Bau sehr den als Vitamine bekannten Stoffgruppen.

■ Ein an den Atmungsvorgängen (biologische Oxydation, ↗ S. 70f.) beteiligtes Koenzym wird aus dem Vitamin B_1 (Aneurin) durch Anlagerung von zwei Phosphatgruppen gebildet. Fehlt



Aus dem Vitamin B_1 wird durch Anlagerung von Phosphorsäure ein aktives Koenzym gebildet

in der tierischen oder menschlichen Nahrung das Vitamin B_1, stellen sich als Folge von mangelnder Koenzymbildung Stoffwechselstörungen ein.

Enzyme haben in den Zellen katalytische Funktion und sind als Eiweißmoleküle oft gleichzeitig Baustein einer Zellstruktur (■ Biomembran). Dort können jene Enzymeiweiße, die in einer Reaktionskette aufeinanderfolgende Umsetzungen katalysieren, auch räumlich nebeneinander angeordnet sein. Das Reaktionsprodukt der ersten Reaktion ist dabei gleichzeitig das Substrat der zweiten Umsetzung, das Produkt der zweiten das Substrat der dritten Reaktion und so weiter. Häufig sind bestimmte Enzyme bestimmten Zellorganellen zugeordnet (■ Atmungsenzyme in Mitochondrien, Enzyme der Kohlendioxidassimilation in den Chloroplasten). Räumliche und zeitliche Ordnung des Stoffwechselvorganges bedingen sich daher gegenseitig. ③

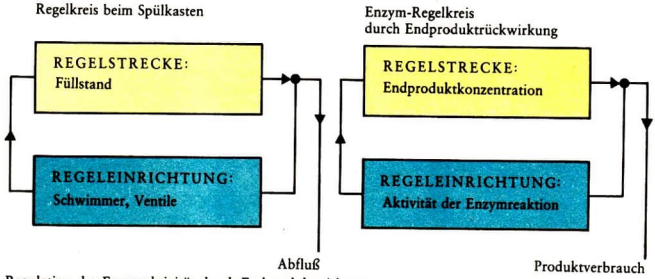
▶ *Enzyme sind wichtige Katalysatoren und gleichzeitig Regulatoren von Stoffwechselabläufen.*

Vom Bestand einer Zelle an unterschiedlichen Enzymen sowie von der vorhandenen Menge eines jeden Enzyms hängt es ab, welche Stoffumwandlungen vollzogen werden können und welche Stoffmengen umgesetzt werden. Deshalb können Zellen durch Bildung oder Abbau von Enzymen Stoffumwandlungen verstärken oder verringern. Auf diese Weise erfolgt eine Anpassung des Stoffwechsels an die Menge eines angebotenen Nahrungsstoffes.

① Begründen Sie, warum kleine Mengen eines Enzyms genügen, um große Substanzmengen umzusetzen!

② Erklären Sie, inwiefern Substrat- und Reaktionsspezifität von Enzymen wichtige Voraussetzungen für die Stoffwechselreaktionen sind!

③ Weisen Sie nach, daß räumliche und zeitliche Ordnung von Stoffwechselabläufen von den Enzymen einer Zelle entscheidend bestimmt werden!



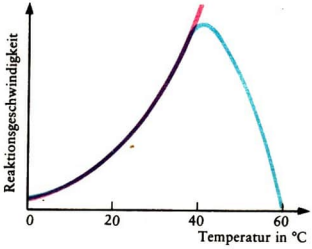
Regulation der Enzymaktivität durch Endproduktwirkung

Anpassungen des Zellstoffwechsels an veränderte Umweltbedingungen können auch durch Regulation der Enzymaktivität realisiert werden. Das geschieht meist nach dem Prinzip eines einfachen Regelkreises. ①

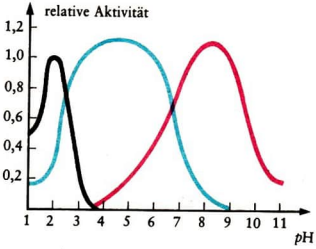
■ Häuft sich das Endprodukt einer enzymatisch katalysierten Umsetzung an, weil die nächste Reaktion nicht abläuft, so bewirkt das Produkt eine Drosselung der Enzymaktivität und umgekehrt. Dieses Prinzip gestattet eine raschere Stoffwechselanpassung als die Erhöhung oder Verminderung der Enzymmenge. ②

Die Aktivität der Enzyme ist auch von äußeren Faktoren abhängig, insbesondere vom *p*H-Wert und von der Temperatur. Diese Abhängigkeit ergibt sich aus der Eiweißstruktur der Apoenzyme. Jedes Enzym erreicht bei einem spezifischen *p*H-Wert das Maximum seiner Aktivität.

Der Einfluß der Temperatur folgt in gewissen Grenzen der chemischen Regel, daß Temperaturerhöhung die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Das trifft aber bei Temperaturen über 40 °C nicht mehr zu, da bei diesen Temperaturen Eiweiße beginnen, irreversibel zu denaturieren und beim Verlust der Struktur auch die Aktivität der Enzyme verlorengeht. ③



Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur für eine chemische Reaktion (rot) und eine enzymatische Reaktion (blau)



Abhängigkeit der Enzymwirkung vom *p*H-Wert bei eiweißspaltenden Enzymen: Pepsin (schwarz) und Trypsin (blau) sowie bei einem glukosespaltenden Enzym α-Glukosidase (rot)

Auch bestimmte Chemikalien (■ Schwermetall-Ionen, Säuren), die zur Denaturierung von Eiweißen führen, können die Enzymaktivität hemmen. ④

Temperatur und *p*H-Wert der höchsten Wirksamkeit sind typische Stoffkennzeichen jedes einzelnen Enzyms.

Wirkort und Bildungsort von Enzymen können verschieden sein.

■ In den Zellen der Bauchspeicheldrüse werden Enzyme gebildet, die in den Darm transportiert werden und dort Eiweiße und Polysaccharide abbauen.

In steigendem Maße werden Enzyme in industriellen biotechnischen Verfahren genutzt. Seit langem geschieht dies bei der Malzbereitung, bei der Herstellung von Essig oder beim Backen (↗ S. 80). Durch moderne Forschungsmethoden und Technologien gelang es, größere Mengen aktiver Enzyme rein darzustellen. Damit ist die Nutzung einiger biologischer Katalysatoren für Stoffumwandlungen in industriellem Maßstab möglich geworden.

Die Forschungsarbeiten in dieser Richtung gehen weiter. Gelänge es zum Beispiel, die Prinzipien der Biokatalyse, welche der Bindung von Luftstickstoff durch Bakterien zugrunde liegt, industriell zu nutzen, so könnte damit das außerordentlich energieaufwendige Haber-Bosch-Verfahren abgelöst werden.

▶ Enzyme sind Biokatalysatoren und ermöglichen durch Reaktionsbeschleunigung Stoffumwandlungen unter normalen Temperatur- und Druckbedingungen in den Lebewesen.

Enzyme gehören zur Stoffklasse der Eiweiße und bestehen meist aus Eiweiß, der Trägersubstanz, und Nichteiweiß, dem Koenzym. Enzyme wirken spezifisch auf bestimmte Stoffe (Substratspezifität) und katalysieren nur bestimmte Reaktionen (Reaktionsspezifität).

Anzahl und Menge der einzelnen Enzyme sind in der Zelle innerhalb gewisser Grenzen veränderlich.

Die Enzyme wirken innerhalb der Zelle in verschiedenen Reaktionsräumen.

Die Aktivität des einzelnen Enzyms kann nach Art eines Regelkreises reguliert werden.

Enzyme sind die wichtigsten Regulatoren im Stoffwechsel der Lebewesen. Mit ihrer Hilfe können sich die Lebewesen wechselnden Anforderungen durch Umwelteinflüsse im Verlaufe ihrer Entwicklung anpassen.

① Erklären Sie analog zur Füllstandsregelung durch den Schwimmer in einem Wasserbecken die Regulation der Aktivität eines Enzyms!

② Erläutern Sie, wie sich Lebewesen mit Hilfe der Enzyme wechselnden Anforderungen an ihren Stoffwechsel im Verlaufe der Entwicklung oder bei Umweltänderungen anpassen können!

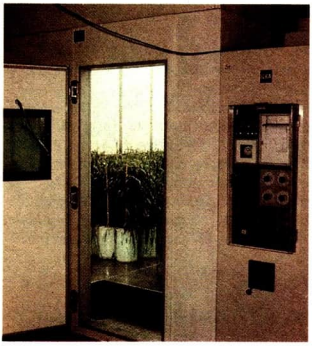
③ Definieren Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Chemieunterricht in der Klasse 11 die Begriffe Denaturierung und irreversible Denaturierung!

④ Weisen Sie die Hemmung der Enzymwirkung a) durch Temperaturen über 40 °C und b) durch Schwermetallsalze nach!

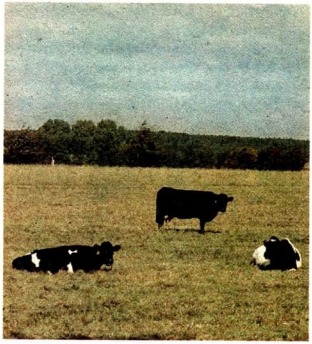
a) Temperieren Sie im Wasserbad jeweils 1 Reagenzglas mit 10 ml Stärkelösung auf 20 °C, 40 °C, 80 °C! Geben Sie in alle 3 Reagenzgläser je 2 ml Enzymlösung! Prüfen Sie in Abständen durch Tüpfeln mit Jodlösung auf Stärke!

b) Füllen Sie 3 Reagenzgläser mit je 10 ml Stärkelösung! Geben Sie in das 1. Glas einige Körnchen Kupfersulfat, in das 2. Glas Silbernitrat, das 3. Glas dient der Kontrolle. Geben Sie je 2 ml Enzymlösung dazu! Prüfen Sie durch Tüpfeln mit Jod-Kaliumjodid-Lösung auf Stärke!

Autotrophe Assimilation



Untersuchen autotropher Assimilationsprozesse durch geregelte Umwelteinflüsse im Phytotron



Autotrophe Kohlenstoffassimilation als Lebensgrundlage für heterotrophe Organismen

Aus der Umwelt in die Zellen der Lebewesen aufgenommene Stoffe werden im Verlaufe des Stoffwechsels in Menge und Zusammensetzung dem Bedarf des jeweiligen Lebewesens angepaßt.

▶ *Assimilation ist die Aufnahme körperfremder Stoffe aus der Umwelt und ihre Umwandlung in die dem jeweiligen Bedarf angepaßten körpereigenen Stoffe.*

Die Assimilation anorganischer Verbindungen ist eine autotrophe Assimilation; sie kommt vorwiegend bei grünen Pflanzen vor. Die Assimilation organischer Stoffe ist eine heterotrophe Assimilation; sie ist bei Tieren am deutlichsten zu erkennen. Unter den Bakterien gibt es Vertreter mit autotropher Assimilation und andere, die ihre Nahrungsstoffe heterotroph assimilieren. ①②

Durch autotrophe Assimilation erfolgt die Umwandlung anorganischer in organische Stoffe, die dann die Grundlage für die heterotrophe Assimilation bilden.

Die wichtigsten Ausgangsstoffe der autotrophen Assimilation sind Kohlendioxid (CO_2), Stickstoff der Luft (N_2) oder Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}).

In den körpereigenen Verbindungen liegen die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) gegenüber der anorganischen Form reduziert vor (■ Kohlenhydrat $[CH_2O]_n$, Aminogruppe $-NH_2$ in Eiweißen, Sulfhydrylgruppe $-SH$ in Eiweißen). In den erforderlichen Reduktionsvorgängen liegt die Ursache für den hohen Energiebedarf des ersten Hauptschrittes der autotrophen Assimilation; Reduktionen sind in vielen Fällen stark endotherme Prozesse. Als Reduktionsmittel spielt Wasserstoff die Hauptrolle. ③

▶ *Die Umwandlung körperfremder anorganischer Stoffe in körpereigene Stoffe vollzieht sich in geregelten Folgen von zahlreichen Einzelreaktionen, die durch Enzyme katalysiert werden.*

Durch den schrittweisen Ablauf sind unter den in Lebewesen herrschenden Bedingungen weitreichende Stoffumwandlungen möglich (■ Bildung von Kohlenhydraten aus Kohlendioxid und Wasser). In diesen Reaktionsfolgen sind drei Hauptabschnitte erkennbar:

— Synthese niedermolekularer organischer Zwischenverbindungen aus anorganischen Stoffen, verbunden mit einem hohen Energieaufwand;
— Umwandlung dieser Zwischenverbindungen in die Bausteine der höhermolekularen körpereigenen Substanzen;
— Aufbau von Polysacchariden, Eiweißen, Nukleinsäuren und Fetten.

Die beiden letzten Schritte bedürfen einer geringeren Energiezufuhr als der erste Schritt.

Die autotrophe Assimilation als energiebindender Vorgang führt zur Bildung von Stoffen, Assimilaten, die die Hauptenergiequelle für alle nicht autotrophen Lebewesen beziehungsweise für alle nicht autotrophen Zellen oder Gewebe bilden. ④

Während Elemente wie Stickstoff oder Schwefel nur in bestimmten organischen Verbindungen vorkommen (■ Eiweiße, Nukleinsäuren), stellt Kohlenstoff auf Grund seiner besonderen chemischen Eigenschaften das wichtigste Element aller organischen Verbindungen dar. Die autotrophe Kohlenstoffassimilation ist daher der wichtigste autotrophe Assimilationsvorgang.

Ausgangsstoffe der autotrophen Kohlenstoffassimilation sind Kohlendioxid und Wasser.

▶ *Autotrophe Kohlenstoffassimilation ist die Bildung von Kohlenhydraten durch die Reduktion von Kohlendioxid.*

Die Reduktion findet nicht direkt am Kohlendioxid, sondern erst an dessen Umwandlungsprodukten statt. Der Wasserstoff dazu stammt aus dem Wasser. Aus den nach Übertragung des Wasserstoffs bleibenden Resten der Wassermoleküle wird Sauerstoff gebildet, der überwiegend als nicht verwertbares Reaktionsprodukt an die Umwelt abgegeben wird. ⑤

Nach der Art der Energiequelle für die Kohlendioxidreduktion werden Photosynthese — Energiequelle ist das Sonnenlicht — und Chemosynthese — Energiequelle sind chemische Umsetzungen (■ Oxydation) — unterschieden.

■ Oxydation von Schwefelwasserstoff durch Schwefelbakterien (■ bei der biologischen Reinigung von Gewässern).

■ Oxydation von Ammoniak zu Nitrit und Nitrat durch nitrifizierende Bakterien (■ bei der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit).

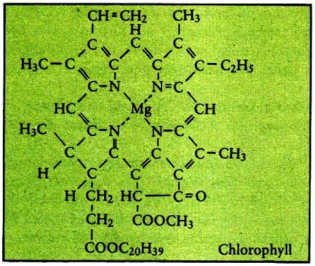
Die Nutzung der Lichtenergie für die autotrophe Kohlenstoffassimilation ist an das Vorhandensein von Chlorophyll gebunden. Am Chlorophyll beginnt die Umwandlung von Strahlungsenergie in chemische Energie, die für die spätere Reduktion des Kohlendioxids zu Kohlenhydraten genutzt wird. Die Endprodukte der Kohlendioxidassimilation sind die Assimilate.

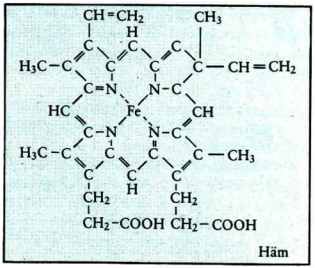
① Definieren Sie den Begriff Assimilation!
② Erläutern Sie den Unterschied zwischen autotropher und heterotropher Assimilation an je einem konkreten Beispiel! Nutzen Sie dabei Ihre Kenntnisse aus dem Biologieunterricht in den Klassen 8 und 9!
③ Nennen Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 9 eine mögliche Energiequelle für die autotrophe Assimilation!
④ Nennen Sie Beispiele für nicht autotrophe Zellen oder Gewebe autotropher Organismen!
⑤ Nennen Sie die physikalischen Prozesse, die zur Aufnahme von Kohlendioxid und Wasser sowie zur Abgabe von Sauerstoff durch die Pflanze führen! Begründen Sie Ihre Auswahl!

Die Photosynthese

Die Lichtreaktionen der Photosynthese. Die Photosynthese ist stets an Chlorophyll gebunden, das in den Chloroplasten von Pflanzenzellen lokalisiert ist. Chlorophyll ist eine komplizierte organische Verbindung.

Chlorophyll gehört der gleichen Stoffgruppe an wie das Häm des roten Blutfarbstoffes, das an wesentlichen Stoffwechselvorgängen (■ Sauerstofftransport, ↗S. 175) in tierischen Organismen beteiligt ist.

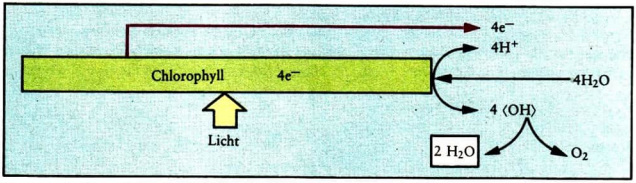




Auf die Chlorophyllmoleküle treffende Lichtquanten geben Energie an die Elektronen des Chlorophylls ab. Durch diese Energieaufnahme kann jeweils ein Elektron eines Chlorophyllmoleküls auf ein höheres Energieniveau gelangen; das betreffende Chlorophyllmolekül geht in einen „angeregten" Zustand über. Die von den Elektronen aufgenommene Energie kann durch eine Reihe nachfolgender Reduktions-Oxydations-Reaktionen (Redoxreaktionen) schrittweise weiter umgesetzt werden. Die durch die Einwirkung der Lichtquanten im Chlorophyll verursachte Elektronenlücke wird mit Elektronen aus dem Wasser aufgefüllt. Auch die Herauslösung von Elektronen aus Wassermolekülen wird durch Lichtenergie unter Beteiligung von Chlorophyll bewirkt.

Der Vorgang der lichtabhängigen Spaltung von Wassermolekülen, die Photolyse, unterscheidet sich grundsätzlich von der einfachen Dissoziation der Wassermoleküle in Protonen und Hydroxyl-Ionen, die ohne Energiebedarf spontan abläuft.

► *Die Photolyse des Wassers ist eine lichtabhängige Spaltung von Wassermolekülen, bei der Wasserstoff-Ionen, Elektronen und OH-Radikale entstehen.*



Schematische Darstellung der Photolyse des Wassers

▶ *Die Lichtreaktionen der Photosynthese sind an Chlorophyll gebunden; sie sind mit einer Photolyse des Wassers verbunden.*

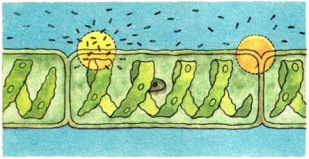
Die Lichtreaktionen der Photosynthese umfassen folgende Schritte:

— Energiereiche Elektronen werden aus dem Chlorophyll freigesetzt; sie stehen für Reduktions-Oxydations-Reaktionen zur Verfügung.

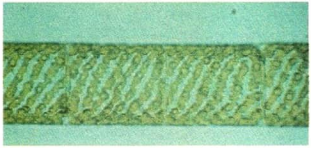
— Infolge der Photolyse des Wasser steht Wasserstoff zur Verfügung, der in nachfolgenden Reaktionen das Kohlendioxid reduziert.

— Die OH-Radikale aus der Photolyse reagieren zu Wasser, das wieder verwendet wird, und zu Sauerstoff, der an die Umwelt abgegeben wird.

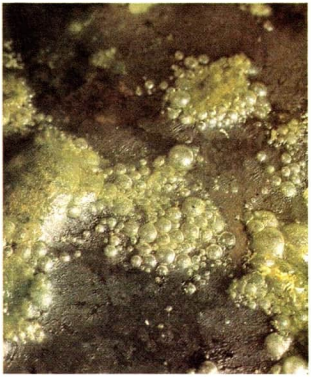
— Die durch Lichtquanten aus dem Chlorophyll gelösten Elektronen werden aus dem Wasser ersetzt, wodurch das Chlorophyll wieder reaktionsbereit ist.



Nachweis der Sauerstoffbildung an der belichteten Stelle des Chloroplasten einer *Spirogyra*-Zelle durch Ansammlung sauerstoffliebender Bakterien



Zellen von *Spirogyra* (300 : 1)



Sauerstoffblasen an Grünalgen (2 : 1)

Der Beweis dafür, daß der bei der Photosynthese gebildete Sauerstoff aus dem Wasser und nicht aus dem Kohlendioxid stammt, wurde mit Hilfe von Isotopen geführt. ①②③④

■ Bei Verwendung von Wasser, dessen Moleküle anstelle von ^{16}O das Isotop ^{18}O enthielten, enthielt der gebildete Sauerstoff das schwere Sauerstoffisotop und nicht ^{16}O, das aus dem Kohlendioxid hätte stammen müssen.

Der Nachweis für die Herkunft des Sauerstoffs bei der Photosynthese gehört zu den ersten biologischen Anwendungen der Isotopentechnik und zeigt die großen Möglichkeiten, die damit für die biologische Forschung erschlossen wurden.

① Erläutern Sie das auf Seite 37 dargestellte Photolyseschema!

② Erläutern Sie die Bedeutung der Photosynthese für die Erhaltung des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre!

③ Erläutern Sie die Bedeutung von Grünanlagen in Wohn- und Industriegebieten!

④ Stellen Sie Beziehungen zwischen der Lichtdurchlässigkeit von Gewässern und dem jeweiligen Besatz an Fischen her!

Aus der Tatsache, daß der Sauerstoff bei der Photosynthese aus dem Wasser stammt, ergibt sich folgende Summengleichung:

$$6\ CO_2 + 12\ H_2O + \text{Lichtenergie} \rightarrow (CH_2O)_6 + 6\ H_2O + 6\ O_2$$

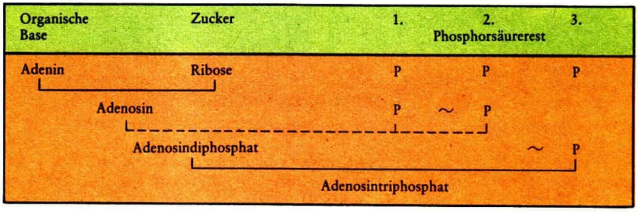
Elektronen und Wasserstoff-Ionen aus den Lichtreaktionen können nicht direkt für die Reduktion des Kohlendioxids genutzt werden. Die Energie der Elektronen wird in Reduktions-Oxydations-Reaktionen einer ganzen Umsetzungskette bei der Bildung von Adenosintriphosphat (ATP), dem universellen Energieüberträger und Energiespeicher im Stoffwechsel aller Lebewesen, gebunden. Der Wasserstoff wird an Koenzyme wasserstoffübertragender Enzyme gekoppelt. Beide Produkte dieser Umsetzungen, ATP und mit Wasserstoff beladenes Koenzym, können dann an den enzymatischen Katalysevorgängen der eigentlichen Kohlendioxidreduktion teilnehmen.

ATP. ATP (Adenosintriphosphat) ist eine chemische Verbindung, bei deren Bildung große Energiemengen gebunden werden. Diese Energie kann bei der weiteren Umsetzung von ATP in endothermen Reaktionen genutzt werden.

Die zentrale Bedeutung des ATP für den Energieumsatz im Stoffwechsel der Lebewesen wurde 1929 von dem deutschen Biochemiker Karl LOHMANN entdeckt.

► *ATP ist ein universeller Energieüberträger und Energiespeicher in den Stoffwechselprozessen aller Lebewesen.*

Das ATP-Molekül besteht aus der stickstoffhaltigen organischen Base Adenin, an die über ein Zuckermolekül mehrere Phosphorsäurereste gebunden sind. Bei der Übertragung und Bindung des zweiten beziehungsweise des dritten Phosphorsäurerestes werden besonders hohe Energiemengen gebunden. Die Bindungen zwischen den Phosphorsäureresten werden durch ~ gekennzeichnet.

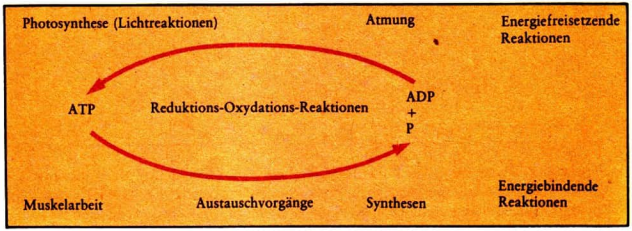


Die Energie stammt in den meisten Fällen aus den Reduktions-Oxydations-Reaktionen, die bei den Lichtreaktionen der Photosynthese oder bei Atmungsprozessen (↗ S. 70f) ablaufen. Mit diesen Reduktions-Oxydations-Reaktionen ist die Übertragung von Phosphatresten auf Adenosindiphosphat (ADP) gekoppelt. Bei der Bildung eines Mol ATP aus Phosphorsäure und ADP werden 37 kJ (8,9 kcal) gebunden. Die gleiche Energiemenge wird bei der hydrolytischen Spaltung einer solchen Verbindung frei.

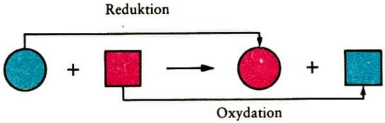
$$\text{Adenosindiphosphat} + P + 37\ kJ \rightleftarrows \text{Adenosintriphosphat} + H_2O$$

Diese Energiemengen können bei Reaktionen des ATP mit anderen Verbindungen für Synthesen makromolekularer Verbindungen (■ Eiweiße, Stärke), für Austausch- und Transportvorgänge (↗ S. 19) oder für Muskelarbeit genutzt werden. Das in den Lichtreaktionen

der Photosynthese gebildete ATP wird also nicht nur für die Reduktion des Kohlendioxids und dessen weitere Umwandlung in Kohlenhydrate genutzt, sondern ist an vielen verschiedenen endothermen Reaktionen beteiligt.



Bildung von ATP in elektronenübertragenden Reduktions-Oxydations-Reaktionen. Oxydationsvorgänge sind zugleich Reduktionsprozesse. Das Oxydationsmittel wird reduziert, und zugleich wird das Reduktionsmittel oxydiert.



Elektronenübertragungsreaktionen gehören zu diesem Typ von Reduktions-Oxydations-Reaktionen.

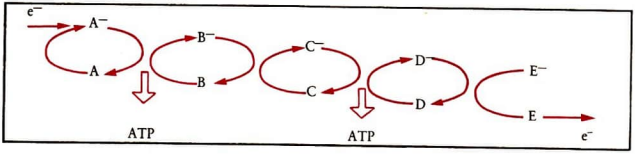
Elektronenabgebende Verbindungen bilden die Reduktionsmittel und werden selbst oxydiert, die Elektronenempfänger werden reduziert und wirken gleichzeitig dabei gegenüber der elektronenabgebenden Verbindung als Oxydationsmittel.

Unter dem Einfluß der Lichtstrahlung werden aus dem Chlorophyll energiereiche Elektronen herausgelöst, die von einer ersten Verbindung „A" aufgenommen und von dieser auf eine zweite Verbindung „B" übertragen werden. A unterliegt einer umkehrbaren Reduktions-Oxydations-Reaktion, wobei es B reduziert und selbst wieder in den oxydierten Zustand zurückgelangt, um erneut durch „energiereiche Elektronen" reduziert werden zu können. B überträgt die Elektronen weiter auf eine dritte Redoxverbindung „C". Auch B unterliegt damit einer umkehrbaren Reduktions-Oxydations-Reaktion, kann also erneut Elektronen von A aufnehmen.

Eine solche Folge von elektronenübertragenden Reduktions-Oxydations-Reaktionen bildet auch die Verbindung zwischen der Photolyse des Wassers und den Chlorophyllmolekülen, deren „Elektronenlücken", die bei der Lichtreaktion entstanden waren, aus dem Wasser aufgefüllt werden.

Bei jedem Übergang von Elektronen von einem auf den anderen Partner in der elektronenübertragenden Redoxkette nimmt das Redoxpotential zu, das heißt, bei der Reduktion der nachfolgenden Verbindung verringert sich die Energie der Elektronen. Die dadurch frei werdende Energie wird bei der Bildung von ATP gebunden.

Die Bildung von ATP aus Phosphorsäure und ADP findet an jenen Stellen der Redoxkette statt, an denen der frei werdende Energiebetrag ausreicht, um eine Phosphatbindung zu knüpfen.



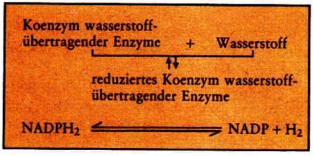
Bildung von Wasserstoff. Am Ende der Reihe von elektronenübertragenden Redoxreaktionen werden die Elektronen gemeinsam mit Protonen auf Koenzyme von wasserstoffübertragenden Enzymen übertragen; die Koenzyme werden auf diese Weise reduziert.

▶ *Die Übertragung von Wasserstoff gehört zu den Reduktions-Oxydations-Reaktionen.*

Die wasserstoffabgebende Verbindung wird oxydiert und gleichzeitig die wasserstoffaufnehmende Verbindung reduziert.

Koenzyme wasserstoffübertragender Enzyme wechseln ständig vom reduzierten in den oxydierten und wieder zurück in den reduzierten Zustand, je nachdem, ob sie mit Wasserstoff beladen werden oder ob sie den Wasserstoff auf eine andere Verbindung übertragen (↗ S. 42).

■ Ein wasserstoffübertragendes Koenzym, das am Ende der elektronenübertragenden Redoxkette den Wasserstoff bindet, ist das NADP (Nikotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat); es wird zu $NADPH_2$ reduziert. Der darin gebundene Wasserstoff wird zur Reduktion des Kohlendioxids bei der Photosynthese verwendet. Ebenso wie ATP kann $NADPH_2$ aber auch in anderen Reduktionsvorgängen des Stoffwechsels umgesetzt werden. NADP ist das Koenzym einer Oxydoreduktase.

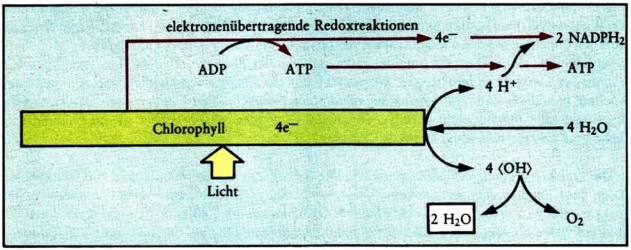


▶ *Oxydoreduktasen sind Enzyme, die Reduktions-Oxydations-Reaktionen katalysieren.* ①

Oxydoreduktasen sind auch an den Elektronenübertragungen in den Reduktions-Oxydations-Reaktionsketten bei den Lichtreaktionen der Photosynthese als Katalysatoren beteiligt.

Überblick über die Abläufe bei der Lichtreaktion. Die vom Licht abhängigen Reaktionen der Photosynthese sind Reaktionen der Energieumwandlung. Sie verlaufen in mehreren Schritten.

▶ *In den Lichtreaktionen der Photosynthese wird Strahlungsenergie des Lichtes in chemische Energie umgewandelt, die für autotrophe Assimilation von Kohlendioxid und andere Stoffwechselreaktionen genutzt werden kann.*



Schematische Darstellung der Energiefreisetzung in einer Redoxkette

— Lichtstrahlung bewirkt die Herauslösung energiereicher Elektronen aus Chlorophyllmolekülen und die Photolyse von Wasser, aus dem die entstandenen Elektronenlücken im Chlorophyll wieder aufgefüllt werden. Auf diese Weise wird Chlorophyll stets wieder in den reaktionsbereiten Zustand zurückversetzt. ②③④⑤

— Die mit Energie aus der Lichtstrahlung beladenen Elektronen durchlaufen Folgen von Reduktions-Oxydations-Reaktionen, wobei auf einigen Stufen Teile ihrer Energie zur Bildung von ATP verwendet werden. ATP ist der universelle Energieüberträger und -speicher im Stoffwechsel.

① Definieren Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Chemieunterricht den Begriff Redoxreaktion! Erläutern Sie Ihre Definition an zwei Beispielen!

② Beschreiben Sie die Wirkung der Lichtquanten an den Chlorophyllmolekülen sowie die weiteren Schritte bei der Umwandlung von Strahlungsenergie in chemische Energie!

③ Erläutern Sie die Funktion des Wassers für die photochemische Umwandlung von Strahlungsenergie in chemische Energie!

④ Weisen Sie in einem Experiment nach, daß grüne Pflanzen bei Belichtung Sauerstoff abgeben! Führen Sie das Experiment mit Wasserpflanzen (■ Wasserpest, Tausendblatt) in wassergefüllten, luftdicht verschlossenen Gefäßen (■ Reagenzgläser, kleine Erlenmeyerkolben) durch! Achten Sie darauf, daß das Wasser möglichst sauerstofffrei ist! Benutzen Sie als Nachweisreagenz alkalische Pyrogallollösung, die sich bei Sauerstoffeinwirkung braun verfärbt (gleiche Teile 10 %ige Pyrogallollösung und 30 %ige Natronlauge)! Setzen Sie drei Versuche an:
1. Gefäß mit Pflanze 20 min bis 30 min belichten;
2. Gefäß ohne Pflanze belichten;
3. Gefäß mit Pflanze abdunkeln.

⑤ Weisen Sie in einem Experiment die Abspaltung von Wasserstoff aus Wasser unter Einwirkung von Lichtenergie und Chlorophyll nach! Stellen Sie eine wäßrige Rohchlorophyll-Lösung her, indem Sie unter Wasserzusatz grüne Blätter in einem Mörser zerreiben. Füllen Sie in 2 Reagenzgläser je 10 ml bis 20 ml dieser Lösung und versetzen Sie sie mit je 10 bis 20 Tropfen einer 1 %igen Kaliumhexacyanoferrat-(III)-Lösung! Setzen Sie ein Reagenzglas 20 min bis 30 min hellem Licht aus, dunkeln Sie das andere Glas ab! Nehmen Sie als Nachweisreagens für Wasserstoff 3 bis 6 Tropfen einer 1 %igen Eisen (III)-chloridlösung! Durch die Reduktion der Eisen^{3+}-Ionen zu Eisen^{2+}-Ionen entsteht ein blauer Niederschlag.

— Die Elektronen reduzieren nach dem Durchlaufen der Redoxreaktionsketten schließlich die Wasserstoff-Ionen, die aus der Photolyse des Wassers stammen, und der gebildete Wasserstoff wird an Koenzyme wasserstoffübertragender Oxydoreduktasen gebunden.

Im Ergebnis der Lichtreaktionen ist Sauerstoff aus der Photolyse des Wassers frei geworden und an die Umwelt abgegeben, ist Wasserstoff an ein Koenzym gebunden und ATP gebildet worden. $NADPH_2$ und ATP werden bei der Kohlendioxidreduktion und anderen Stoffwechselvorgängen in Chloroplasten genutzt. Die Kohlendioxidreduktion selbst ist unabhängig von Licht und geschieht in einer Dunkelreaktion.

Die Dunkelreaktion der Photosynthese. Die Reduktion des Kohlendioxids verläuft in einer Folge von chemischen Reaktionen. Das durch die Spaltöffnungen in die Interzellularen aufgenommene Kohlendioxid gelangt durch Diffusion in die Zellen und an die Reaktionsorte in den Chloroplasten. Dort wird das Kohlendioxid zunächst an einen Akzeptor gebunden, der ein Kohlenhydrat mit 5 Kohlenstoffatomen, eine Pentose, darstellt. Die entstandene C_6-Verbindung ist instabil und zerfällt sofort in 2 Moleküle mit je 3 Kohlenstoffatomen, die zur Stoffgruppe der Karbonsäuren (■ Phosphorglyzerinsäure) gehören.

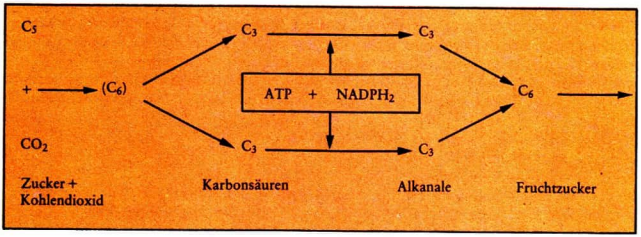
Die Reduktion der Karbonsäuren zu Alkanalen (Aldehyden) wird durch Oxydoreduktasen katalysiert, die das reduzierte wasserstoffübertragende Koenzym $NADPH_2$ enthalten. An der Reduktion ist auch das ATP aus den Lichtreaktionen der Photosynthese beteiligt. Durch Übertragung eines energiereichen Phosphatrestes auf die Karbonsäuremoleküle werden diese in einer Weise aktiviert, die die Reduktion zu Alkanalen ermöglicht. Die Reduktionsprodukte gehören zu den Kohlenhydraten und sind Zucker mit drei Kohlenstoffatomen. ①

▶ *An der Reduktion des gebundenen Kohlendioxids sind $NADPH_2$ und ATP beteiligt.*

Nach der Reduktion des in den Karbonsäuremolekülen gebunden vorliegenden Kohlendioxids zu Kohlenhydraten mit je drei Kohlenstoffatomen (Alkanalen) werden jeweils zwei in weiteren Reaktionsschritten zu dem Monosaccharid Fruktose (Fruchtzucker) vereinigt.

▶ *In der Dunkelreaktion der Photosynthese wird Kohlendioxid über einen Akzeptor in Karbonsäure eingebaut und in dieser Form reduziert. Aus den Reduktionsprodukten wird das Monosaccharid Fruktose synthetisiert.*

Fruktose kann in weiteren Reaktionen zu Glukose (Traubenzucker) umgebildet werden.



Nahezu alle an den Reaktionsfolgen der Kohlenstoffassimilation beteiligten Verbindungen gehören zu den Kohlenhydraten und sind unter den Temperatur- und Druckverhältnissen, die in Lebewesen herrschen, reaktionsträge. Im Stoffwechsel werden sie durch Kopplung mit energiereichen Phosphorsäureresten aktiviert. Durch Abspaltung der Phosphorsäurereste

können die Kohlenhydrate wieder inaktiviert und der weiteren Umsetzung entzogen werden. Durch erneute Bindung an Phosphorsäurereste werden sie reaktiviert und können danach wieder in den Stoffwechsel einbezogen werden. ②

▶ *ATP ist als Energieüberträger ein wichtiger Regulator im Stoffwechsel.*

■ Auch der Akzeptor des Kohlendioxids ist durch 2 Phosphorsäurereste aktiviert und befindet sich deshalb in einem besonders reaktionsbereiten Zustand, ohne den die Umsetzung mit Kohlendioxid nicht vor sich gehen könnte.

Werden 6 Moleküle Kohlendioxid bei der Photosynthese aufgenommen, so entstehen zunächst sechs Moleküle Fruchtzucker mit insgesamt 36 Kohlenstoffatomen, von denen sechs Kohlenstoffatome aus dem aufgenommenen Kohlendioxid stammen. Diese sechs Kohlenstoffatome entsprechen einem Molekül Fruchtzucker; sie bilden den Stoffgewinn bei der Kohlenstoffassimilation. Die anderen Kohlenstoffatome gehörten den Akzeptormolekülen an, diese müssen zurückgewonnen werden. ③④⑤

▶ *Der Stoffgewinn bei der autotrophen Kohlenstoffassimilation entspricht bei sechs Molekülen Kohlendioxid einem Molekül Fruchtzucker.*

Die restlichen fünf Fruchtzuckermoleküle mit insgesamt 30 Kohlenstoffatomen werden durch eine Folge biochemischer Umsetzungen in sechs Moleküle der Akzeptorverbindung zurückverwandelt, von denen jede fünf Kohlenstoffatome enthält, insgesamt also ebenfalls 30 Kohlenstoffatome. Schließlich wird der Akzeptor durch Reaktion mit ATP und Kopplung an Phosphorsäurereste wieder aktiviert, so daß der Reaktionskreis geschlossen werden und erneut Kohlendioxid gebunden werden kann.

▶ *Das Prinzip kreisförmig in sich zurücklaufender Reaktionsfolgen ist in vielen Formen im Stoffwechsel der Lebewesen verwirklicht.*

Die Assimilation von Kohlenstoffatomen aus 6 Molekülen Kohlendioxid geschieht in einer kreisförmigen Reaktionsfolge, die vier wichtige Abschnitte umfaßt:

— Bindung der sechs Kohlendioxidmoleküle an sechs Moleküle des Akzeptors mit je fünf Kohlenstoffatomen; anschließender sofortiger Zerfall der Reaktionsprodukte in zwölf Karbonsäuremoleküle mit je drei Kohlenstoffatomen. (I)

— Aktivierung der Karbonsäuremoleküle durch Übertragung von Phosphorsäureresten aus ATP und Reduktion der aktivierten Karbonsäuremoleküle mit Hilfe von Oxydoreduktasen durch $NADPH_2$, wobei zwölf Moleküle eines Zuckers (Alkanal) mit je drei Kohlenstoffatomen entstehen. (II)

— Reaktion dieser zwölf Zuckermoleküle zu sechs Molekülen Fruchtzucker mit je sechs Kohlenstoffatomen. Ein Molekül Fruchtzucker wird als Stoffgewinn der Kohlenstoffassimilation aus dem Kreislauf ausgeschieden. (III)

— Rückbildung der sechs Akzeptormoleküle mit je fünf Kohlenstoffatomen aus fünf Molekülen Fruchtzucker mit je sechs Kohlenstoffatomen. Aktivierung der Akzeptormoleküle mit ATP. (IV)

① Erläutern Sie, welche Funktion Oxydoreduktasen und wasserstoffübertragende Koenzyme bei der Photosynthese haben!

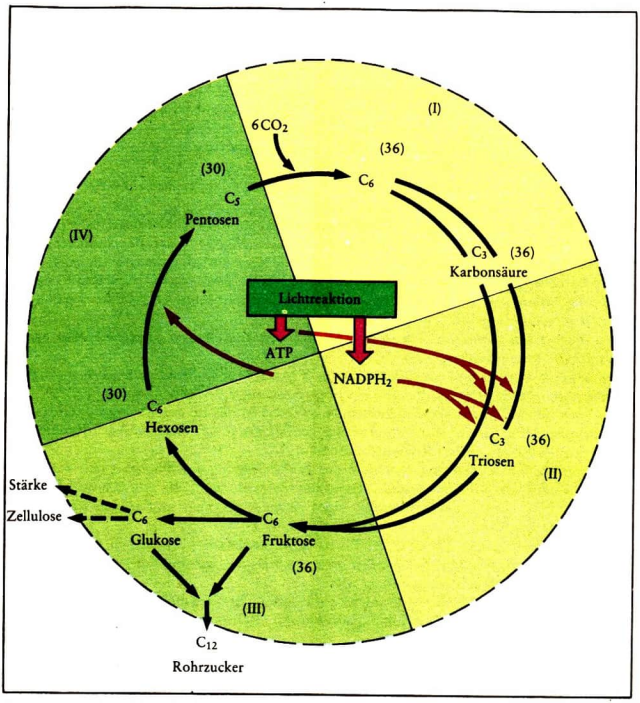
② Erläutern Sie an Beispielen, weshalb ATP als universeller Energiespeicher und -überträger im Stoffwechsel bezeichnet werden kann!

③ Weisen Sie mit Hilfe von Jod-Kaliumjodidlösung in den Chloroplasten von Moosblättern oder Blättern höherer Pflanzen die stärkehaltigen Bereiche nach!

④ Weisen Sie mit Fehlingscher Lösung den in grünen Blättern (■ bei Zwiebel, jungen Gräsern) gebildeten Traubenzucker nach! Fertigen Sie ein Protokoll über Planung, Durchführung und Auswertung an!

⑤ Begründen Sie die Notwendigkeit der Akzeptorrückbildung!

Der als Stoffgewinn in der Photosynthese gebildete Fruchtzucker ist der Ausgangsstoff bei der Bildung der meisten Assimilate (■ Synthese von Traubenzucker und Rohrzucker). ①②③



Schematische Darstellung des Kreislaufs der Kohlendioxidreduktion bei der Photosynthese

① Erläutern Sie umfassend den Begriff Photosynthese!

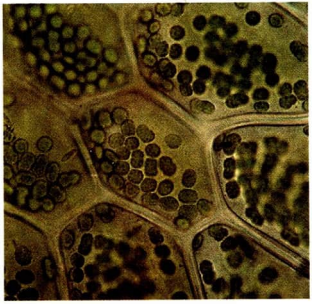
② Worauf beziehen sich die Bezeichnungen Licht- und Dunkelreaktionen bei der Photosynthese?

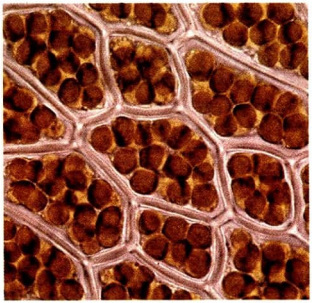
③ Nennen Sie die 4 Abschnitte der kreisförmigen Reaktionsfolge bei der Reduktion des Kohlendioxids, erklären Sie ihre Funktionen und erläutern Sie daran das Wesen kreisförmig in sich zurücklaufender Stoffwechselfolgen!

Assimilatbildung und -speicherung

Die unmittelbaren Produkte der autotrophen Kohlenstoffassimilation gehören zur Stoffgruppe der Kohlenhydrate und besitzen drei beziehungsweise sechs Kohlenstoffatome (Triosen, Hexosen). Sie sind durch Veresterung mit Phosphorsäure in reaktionsfähigem Zustand und bilden die Ausgangsstoffe für die Synthese höhermolekularer Assimilate (■ Rohrzucker, Stärke) und verschiedener Aminosäuren in den Chloroplasten.

In allen Fällen wird bei der Synthese hochmolekularer Assimilate Energie gebunden, die durch Übertragung von Phosphorsäureresten aus ATP bereitgestellt wird.





Chloroplasten in Zellen von Farnvorkeimen; nach Anfärben mit Jodlösung (rechts) sind die Stärkekörner als dunkle Punkte sichtbar (800 : 1)

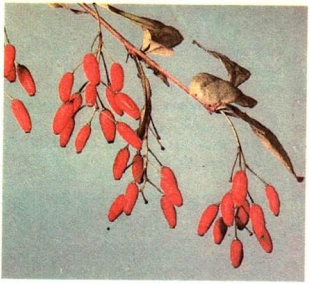
Da die primär gebildeten Assimilate, Frucht- und Traubenzucker, aktivierende Phosphorsäurereste tragen, ist an den Rohrzucker zunächst auch Phosphorsäure gebunden. Zur Speicherung in Zuckerrüben oder in den Halmen des Zuckerrohrs wird der Rohrzucker durch Abtrennung des Phosphorsäurerestes inaktiviert. Der freie Rohrzucker ist speicherfähig. Rohrzucker stellt außerdem die wichtigste Transportform des Zuckers in den Stengeln und Stämmen der Pflanzen dar.

Glukosephosphat, das aus der Umwandlung von Fruktose im Anschluß an die Kohlendioxidassimilation entsteht, bildet den Ausgangsstoff für die Stärkesynthese.

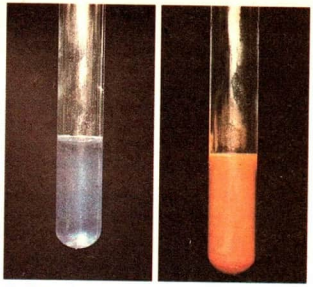
Die gebildete Stärke in Chloroplasten kann unter dem Mikroskop beobachtet werden.

Stärke oder Rohrzucker werden in den Chloroplasten nur zeitweilig angereichert. Meist erhöht sich der Rohrzucker- oder Stärkegehalt im Verlaufe des Tages, da der Abtransport von Assimilaten langsamer als die Synthese vor sich geht. In der Nacht werden die Assimilatüberschüsse aus den Chloroplasten in andere Teile der Pflanzen verlagert, darunter auch in Organe, die speziell der Speicherung von Assimilaten dienen und in den meisten Fällen Vermehrungs- und Überdauerungsfunktionen für diese Pflanzenart haben.

Neben dem Samen dienen Knollen (■ Kartoffel, Maniok) oder Wurzeln (■ Zuckerrübe) als Speicherorgane für Assimilate. Die biologische Funktion der Assimilationsspeicherung besteht in der Stoffbereitstellung für das Wachstum von Jungpflanzen, die aus den Knospen der Überdauerungsorgane getrieben werden (■ Auskeimen der Kartoffeln, Austreiben der Frühblüher).



Früchte der Berberitze



Zuckernachweis

Assimilate werden auch in Samen angereichert, wo sie nach Abtrennung der Samen von den Mutterpflanzen während der Keimung zur Ernährung des Embryos dienen, ehe dieser sich so weit entwickelt hat, daß seine autotrophe Assimilation den Stoffbedarf für Erhaltung und Wachstum decken kann.

Schließlich werden Assimilate auch in Sproßachsen der Pflanzen gespeichert. Die in den Stämmen von einheimischen Bäumen und Sträuchern gespeicherten Assimilate bilden die Grundlage für das Austreiben der Holzgewächse im Frühjahr.

Die Erzeugung und Ernte von Speicherorganen ist Hauptziel im Ackerbau auf der Welt. Getreidekörner und Hülsenfrüchte bilden den größten Anteil der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion; ein großer Teil davon wird direkt als Nahrungsmittel für die Menschen genutzt, während ein anderer Teil als Futter in der Tierproduktion verwertet wird, um Fleisch zu erzeugen, das schließlich ebenfalls der menschlichen Ernährung dient.

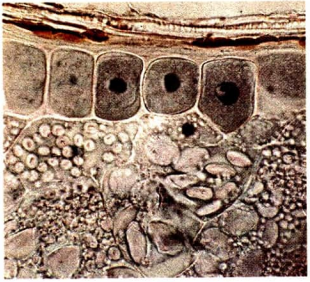
Ebenso wie Samen werden vegetative Speicherorgane sowohl für die direkte menschliche Ernährung als auch für die Tierfütterung genutzt.

■ Aus den Stengeln des Zuckerrohrs wird das Assimilat Rohrzucker gewonnen. Auch der Blutungssaft von Stämmen des nordamerikanischen Zuckerahorns wird in geringem Umfang für die Gewinnung von Rohrzucker genutzt. ① ② ③

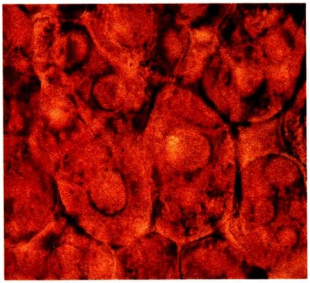
► *Die Synthese speicherfähiger Assimilate und ihre Konzentration in Überdauerungs- und Vermehrungsorganen hat eine wichtige biologische Funktion; sie bildet gleichzeitig die Grundlage für die gesamte menschliche Ernährung.*

In den allermeisten Fällen erfolgt die Stoffspeicherung in Gestalt hochmolekularer Verbindungen, der Kohlenhydrate, Fette oder Eiweiße. Getreidekörner speichern hauptsächlich Kohlenhydrate (Stärke) und in geringerem Umfang Eiweiß. In den Samen der Schmetterlingsblütengewächse liegt der Eiweißanteil wesentlich höher als beim Getreide; daneben enthalten Samen der Hülsenfrüchte reichlich Stärke oder auch Fette. Speicherung von Fetten als Assimilate ist für Sonnenblumen, Raps oder Palmkerne charakteristisch.

Die Speicherung der Assimilate in membranumhüllten speziellen Zellräumen (↗ S. 14 u. S. 18) und ihre Wasserunlöslichkeit bilden einen wirksamen biologischen Schutzmechanismus gegen die Einbeziehung der Assimilate in den biologischen Abbau bei Stoffwechselreaktionen in den Zellen. Gleichzeitig werden die Assimilationsprodukte auf diese Weise osmotisch unwirksam gemacht. Während niedermolekulare organische Verbindungen (■ Glukose,



Eiweiß- (oben) und Stärkekörner im Roggenkorn (1000 : 1)



Fetttropfen in den Zellen der Keimblätter der Haselnuß (1000 : 1)

Fruktose, Rohrzucker, Aminosäuren, Glyzerin) osmotisch stark wirksame Verbindungen sind und deshalb in den Zellen nur in sehr begrenztem Maße angereichert werden können, bedeutet die Bildung hochmolekularer wasserunlöslicher Assimilate eine Assimilatanreicherung in osmotisch weitgehend unwirksamer Form. Auch die Überführung von tagsüber entstehenden Assimilatüberschüssen in Stärke innerhalb der Chloroplasten (↗ S. 14) bewirkt einen osmotischen Schutz. ④

Durch hydrolytisch spaltende Enzyme (Hydrolasen, ↗ S. 30 f.) können die wasserunlöslichen hochmolekularen Speicherstoffe in wasserlösliche niedermolekulare Substanzen übergeführt und in dieser Form in den Pflanzen transportiert werden. Sie gelangen auf diese Weise an die Zentren des Wachstums und des Energiebedarfs, wo sie nach erneuter Aktivierung mit Hilfe von energiereichen Phosphorsäureresten aus ATP für die Synthese zelleigener Verbindungen genutzt werden oder durch Oxydation Energie für Synthesen und für die Erhaltung des Lebenszustandes liefern.

Perioden der maximalen Assimilatbildung fallen nicht immer mit Zeiten des hauptsächlichen Bedarfes an Assimilaten in den Pflanzen zusammen. ⑤

► *Assimilatspeicherung und -transport gleichen zeitliche und räumliche Unterschiede von Assimilatbildung und -bedarf aus.*

① Erläutern Sie die Funktion der Assimilatspeicherung für die Pflanze!
② Erläutern Sie die Bedeutung der Assimilatspeicherung in Pflanzen für den Menschen!
③ Nennen Sie heimische Kulturpflanzen zur Gewinnung von Zucker und Stärke! Welche Pflanzenteile dienen jeweils als Speicherorgan?
④ Begründen Sie, warum niedermolekulare Stoffe für die Speicherung in der Pflanzenzelle nicht geeignet sind!
⑤ Nennen Sie auf Grund Ihrer Kenntnisse über die Orte hauptsächlicher Assimilatspeicherung Zeiten im Verlauf der Entwicklung der Pflanzen, in denen ein hoher Assimilatbedarf besteht!

Der Einfluß innerer und äußerer Faktoren auf die Photosynthese

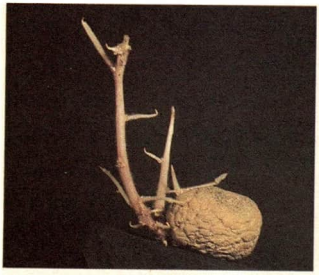
Die Photosyntheseleistung der Pflanzen hängt von zahlreichen inneren und äußeren Bedingungen ab. Kohlendioxid, Wasser, Licht und Temperatur gehören zu den für die Photosynthese unbedingt notwendigen Faktoren der Umwelt. Von den inneren Voraussetzungen haben die Pigmente, Enzyme und Strukturen der Chloroplasten entscheidenden Anteil am Ablauf der Photosynthese. ①

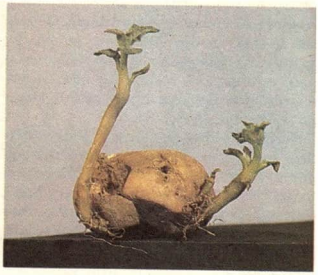
▶ *Die photosynthetische Leistung wird jeweils von jenem Faktor begrenzt, der im Minimum vorliegt.*

Der begrenzende Faktor ist der Minimumfaktor.

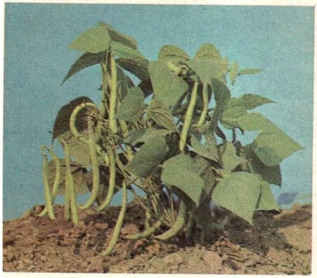
Die Bedeutung der inneren Faktoren der Photosynthese wird besonders während der Keimung und während der Alterungsprozesse deutlich.

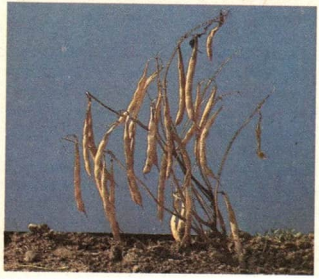
■ Im Dunkeln angekeimte Samen enthalten im Keimling kein Chlorophyll, und ihre Chloroplasten besitzen noch nicht die endgültige Struktur, die für die volle Photosyntheseaktivität erforderlich wäre. Bei Belichtung erreichen diese Keimlinge erst allmählich den vollständigen Chlorophyllgehalt und die Struktur photosynthetisch aktiver Chloroplasten.





Keimsprosse der Kartoffel, links im Dunkeln gehalten, rechts nach Belichtung





Grüne und durch Chlorophyllabbau vergilbte reife Früchte der Garten-Bohne

Das Licht selbst steuert dabei die Synthese des Farbstoffs. In der Ergrünungsperiode der Dunkelkeimlinge begrenzen in der Regel die inneren Faktoren die Photosyntheseaktivität. ②

■ Alternde Blätter verlieren die grüne Färbung als Folge des Chlorophyllabbaus. Die Blätter vergilben, gleichzeitig werden auch ihre Eiweiße abgebaut.

Durch Alterungserscheinungen an den Blättern verringert sich die Photosyntheseaktivität der Blätter, und die inneren Voraussetzungen für die Kohlenstoffassimilation werden zu Minimumfaktoren. Blattvergilbung tritt bei mehrjährigen Pflanzen in gemäßigten Klimazonen während des Herbstes auf. Einjährige Pflanzen zeigen besonders während der Samenreifung Blattvergilben. Dabei werden meist zuerst die ältesten Blätter gelb. ③

Auch bei Mängeln in der Pflanzenernährung vergilben die ältesten Blätter als erste, während die jungen Blätter weiterhin oder doch wesentlich länger grün bleiben. Oft ist Blattvergilben auch eine Folge von Infektionskrankheiten oder Schädlingsbefall. In vielen Fällen kommt es dabei zu herabgesetzter Photosyntheseleistung durch die begrenzende Wirkung der inneren Faktoren auf die Photosynthese.

Licht. Licht kann als begrenzender Faktor auf die Lichtreaktionen der Photosynthese wirken. Die Pflanzen nehmen bei der Photosynthese Kohlendioxid auf und geben Sauerstoff ab, während sie bei der Atmung Sauerstoff aufnehmen und Kohlendioxid abgeben. Vorausgesetzt, daß keiner der anderen Faktoren sich im Minimum befindet, wird es von der Lichtintensität abhängen, ob durch Photosynthese mehr Kohlendioxid assimiliert als bei der Atmung abgegeben wird. Das ist bei vollem Tageslicht stets der Fall. In der Morgen- und Abenddämmerung kommt es jedoch täglich zu einer Lichtintensität, bei der sich Kohlendioxidabgabe infolge Atmung und Kohlendioxidaufnahme infolge photosynthetischer Assimilation im Gleichgewicht befinden, so daß weder Kohlendioxidaufnahme noch -abgabe gemessen werden können.

▶ *Der Kompensationspunkt der Photosynthese wird beeinflußt durch die Lichtintensität; er ist erreicht, wenn Kohlendioxidaufnahme und -abgabe sich im Gleichgewicht befinden.*

Die stammesgeschichtliche Entwicklung der Pflanzen hat dazu geführt, daß es Pflanzen mit typischen Unterschieden in der Lage des Kompensationspunktes und im Verlauf der Licht-Assimilations-Kurve gibt.

Kräuter und Sträucher aus dem Unterholz eines naturnahen Waldes erreichen ihren Kompensationspunkt schon bei geringerer Lichtintensität als die dem Licht unmittelbar ausgesetzten Kronen der herausragenden hohen Bäume. ④

▶ *Lichtpflanzen und Schattenpflanzen unterscheiden sich durch die Lage des Kompensationspunktes und der Lichtsättigung bei unterschiedlichen Lichtintensitäten.*

Auch innerhalb einer Baumkrone sind Angepaßtheiten an die von außen nach innen abnehmende Lichtintensität erkennbar.

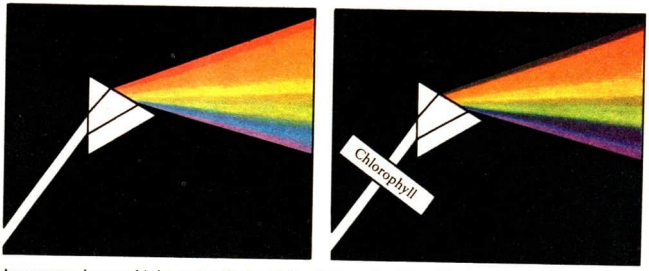
■ Die Blätter an der Peripherie der Krone einer Rot-Buche sind häufig derb lederig und haben eine relativ kleine Spreite; die chlorophyllhaltigen Zellen des Palisadengewebes können in

① Erläutern Sie den Anteil der genannten inneren und äußeren Faktoren in ihrer Wirkung auf die Photosynthese!

② Begründen Sie die Begrenzung der Photosyntheseleistung bei jungen Pflanzenzellen durch innere Faktoren! Vergleichen Sie dazu anhand der Abbildungen auf den Seiten 9 und 14 die Ausbildung von Proplastiden junger Pflanzenzellen und vollentwickelte Chloroplasten!

③ Stellen Sie mögliche Ursachen für den Zusammenhang von Blattvergilben und Samenreife heraus! Begründen Sie Ihre Aussage!

④ Begründen Sie die Ausbildung unterschiedlicher Kompensationspunkte bei Pflanzen der Kronen- und der Krautschicht!



Ausnutzung der verschiedenen Anteile des Lichtspektrums durch das Chlorophyll. Durch eine vor ein Prisma geschaltete Küvette mit einer Chlorophyllösung werden besonders rote und blaue Anteile des weißen Lichts absorbiert

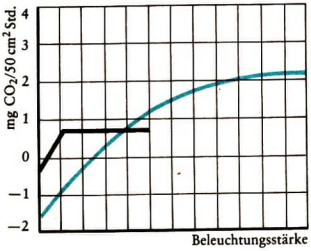
zwei Schichten angeordnet sein. Die innerhalb der schattigen Krone wachsenden Blätter sind in der Regel zarter, ihre Blattspreiten sind relativ groß, die Zellen des Palisadengewebes liegen in einer Schicht an der Oberseite der Blätter, der Chlorophyllgehalt der Zellen ist größer als bei Lichtblättern.

Neben den äußerlich sichtbaren Unterschieden im Blattbau — die häufig gleichzeitig Angepaßtheiten an andere Umweltfaktoren darstellen (■ Verdunstungsschutz) — und im Chlorophyllgehalt lassen sich auch Unterschiede in der Lage des Kompensationspunktes nachweisen. Schattenblätter nehmen schon bei relativ niedriger Lichtintensität mehr Kohlendioxid zur Assimilation auf, als sie bei der Atmung abgeben, während Lichtblätter dazu relativ hohe Lichtintensitäten brauchen. Ihre photosynthetische Leistung liegt bei hohen Lichtintensitäten allerdings wesentlich höher als bei Schattenblättern.

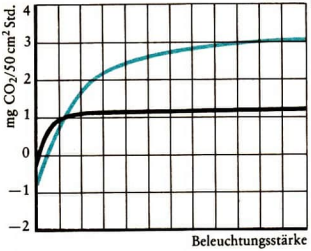
Peltigera

Brunnen-Lebermoos

1. Begründen Sie die Abhängigkeit der Kohlendioxid-Photosynthese-Kurve von der Öffnungsweite der Spaltöffnungen!
2. Erläutern Sie, welche äußeren Faktoren über die Beeinflussung der Spaltöffnungsweite indirekt auf die Photosynthese einwirken!



Licht-Photosynthesekurve bei Lichtpflanzen (■ *Peltigera*, blau) und Schattenpflanzen (■ Lebermoos, schwarz)

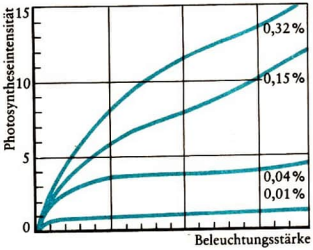


Licht-Photosynthesekurven bei Lichtblättern (blau) und Schattenblättern (schwarz) an einer Pflanze (■ Rot-Buche)

Kohlendioxid. Unter natürlichen Bedingungen ist in der Regel Kohlendioxid der im Minimum vorliegende Faktor. In der Erdatmosphäre sind 0,03 % des Volumens an Kohlendioxid enthalten.

Steigerung des Kohlendioxidgehaltes der Luft im Laborversuch auf 0,1 % führt bei konstanter und ausreichender Lichtintensität zu deutlicher Erhöhung der Kohlenstoffassimilation. Erst bei wesentlich höheren Kohlendioxidkonzentrationen (mehr als 1 %) kommt es zu einer Schädigung der Pflanzen und damit zum Absinken der Photosyntheseleistung. Verringerung der Kohlendioxidkonzentration in der Luft führt auch bei hoher Lichtintensität zu einem Punkt, an dem Aufnahme von Kohlendioxid für die Photosynthese und Abgabe von Atmungs-Kohlendioxid im Gleichgewicht stehen, damit ist der Kohlendioxid-Kompensationspunkt erreicht; bei weiterer Verringerung der Kohlendioxidkonzentration überwiegt die Abgabe von Atmungskohlendioxid.

Die Wirkung der Kohlendioxidkonzentration in der Luft auf die Photosynthese ist außer von der Lichtintensität auch von anderen äußeren Faktoren abhängig. ①②



Licht-Photosynthesekurven von Wassermoos bei unterschiedlicher Kohlendioxidkonzentration

Wassermoos

Temperatur. Die photochemischen Vorgänge bei den Lichtreaktionen der Photosynthese sind temperaturunabhängig, soweit an ihnen keine Enzyme teilnehmen. Dagegen zeigen die enzymatisch katalysierten chemischen Reaktionen des Stoffwechsels alle eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Bei der Photosynthese betrifft dies vor allem die Umsetzungsfolgen in der Dunkelreaktion bei der Reduktion des Kohlendioxids.

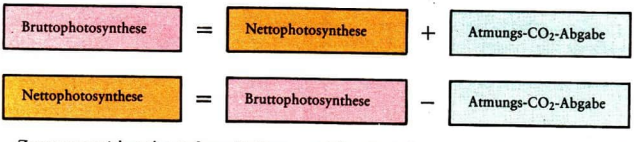
Temperatursteigerungen bis zu ungefähr 35 °C bis 40 °C bewirken eine Erhöhung der Photosynthese, die sich bei höheren Temperaturen zunächst wieder verringert und schließlich Null wird. Dabei muß berücksichtigt werden, daß mit steigender Temperatur auch die Atmungsintensität und damit die Kohlendioxidabgabe zunimmt.

Die Temperaturoptima der Pflanzen für die Photosynthese sind den Klimazonen angepaßt.

■ Pflanzen der gemäßigten Zonen weisen unterhalb 5 °C nur selten eine Stoffzunahme durch Kohlenstoffassimilation auf, und bei 0 °C endet in der Regel jegliche Assimilation. Allerdings assimilieren Blätter von Nadelbäumen auch noch bei tieferen Temperaturen.

Photosynthetischer Stoffgewinn. Einen photosynthetischen Stoffgewinn haben Pflanzen nur dann, wenn mehr Kohlendioxid aufgenommen als bei der Atmung aus der Pflanze ausgeschieden wird. Nur oberhalb des Kompensationspunktes hat die Pflanze eine solche positive Kohlenstoffbilanz, obwohl auch bei niedrigeren Kohlendioxidkonzentrationen oder Lichtintensitäten Kohlendioxid-Moleküle assimiliert werden. Deshalb wird zwischen Brutto- und Netto-Photosynthese unterschieden. ①

Nur wenn die Nettophotosynthese einen positiven Wert aufweist, besteht die Voraussetzung dafür, daß ein Teil der gebildeten Assimilate gespeichert werden kann. Eine positive Nettophotosynthese ist für den Menschen besonders bei Kulturpflanzen wichtig. Durch gezielte Beeinflussung und Veränderung der auf die Photosynthese einwirkenden Faktoren ist es möglich, den photosynthetischen Stoffgewinn zu erhöhen. ②



Zusammenwirken der äußeren Faktoren und ihre Beeinflussung zur Steigerung der Stoffproduktion. Temperatur, Kohlendioxid, Wasser, Licht und Mineralstoffernährung der Pflanzen bestimmen in komplizierter Wechselwirkung untereinander und mit den inneren Bedingungen für die Photosynthese die jeweilige Nettoassimilation der Pflanzen. Die Wirkung wechselnder Lichtverhältnisse hängt von den herrschenden Temperaturen und von der zur Verfügung stehenden Kohlendioxidmenge ab. Gleichzeitig ist von Bedeutung, ob der Photosyntheseapparat der betreffenden Pflanze besonders an die Ausnutzung niedriger oder hoher Lichtintensität angepaßt ist, oder ob es sich um Keimpflanzen, ausgewachsene Blätter oder alternde Organe einer Pflanze handelt.

Die inneren Bedingungen sind durch erbliche Eigenschaften und durch den erreichten Entwicklungszustand der Pflanze bestimmt. Sie bilden den Rahmen für die Photosyntheseleistung der betreffenden Pflanze. Wie weit dieser Rahmen ausgefüllt wird, hängt von den herrschenden äußeren Bedingungen ab. In gewissen Grenzen sind diese äußeren Bedingungen vom Menschen so zu beeinflussen, daß sie zu möglichst maximalen Photosyntheseleistungen führen.

■ Bei der Pflanzdichte im Gartenbau und im Ackerbau spielt nicht nur die Größe der Wurzelsysteme und die Nährstoffversorgung aus dem Boden eine Rolle, sondern auch die gegenseitige Beschattung der Pflanzen. Bei zu dichter Pflanzung kann für die unteren Blätter die Lichtintensität durch die oberen Blätter soweit herabgemindert werden, daß die Stoffproduktion infolge verminderter Photosynthese beeinträchtigt wird.

Eine allgemeine Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft ist im Pflanzenbau unter Freilandbedingungen nicht möglich; in Frühbeeten und Gewächshäusern kann dagegen der Kohlendioxidgehalt der Luft erhöht und dadurch ein höherer Stoffgewinn erzielt werden, der sich in rascherem Pflanzenwachstum äußert.

■ In Frühbeeten kommt es unter der wärmenden Wirkung der Sonnenstrahlung zu erhöhter Aktivität von Bodenmikroorganismen (■ Bakterien, Pilze), die Humus- und Dungstoffe oxydieren. Das dabei entweichende Kohlendioxid reichert sich unter dem Frühbeetfenster an und bewirkt in Kombination mit Licht- und Wärmestrahlung intensive Photosynthese.

In Gewächshäusern wird prinzipiell der gleiche Effekt erzielt, zusätzlich wird teilweise Kohlendioxid aus entsprechend vorbehandelten Industrieabgasen oder aus Kohleverbrennung eingeleitet.

Zusätzliche Belichtung in Gewächshäusern kann ebenfalls zu erhöhter Stoffproduktion führen.

In Freilandkulturen wird durch die Regulierung von Umweltfaktoren (■ Mineralstoff- und Wasserversorgung) das photosynthetische Leistungsvermögen der acker- und pflanzenbaulich genutzten Pflanzen möglichst weitgehend ausgenutzt. Gleichzeitig gehen auch die Bestrebungen in der Pflanzenzüchtung dahin, Getreide und Hülsenfrüchte mit verbesserten Produktionseigenschaften zu entwickeln, die eine günstigere Ausnutzung der photosynthetischen Leistungsfähigkeit gestatten.

1. Entwickeln Sie einfache Versuchsanordnungen, um die Netto-Photosynthese einer Pflanze oder eines Blattes nachzuweisen!
2. Setzen Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus der Klasse 11 die Begriffe Nettophotosynthese und Ertrag zueinander in Beziehung!

Die Bedeutung der Photosynthese für das Leben auf der Erde

▶ *Kohlenstoff ist das Grundelement aller organischen Substanz auf der Erde.*

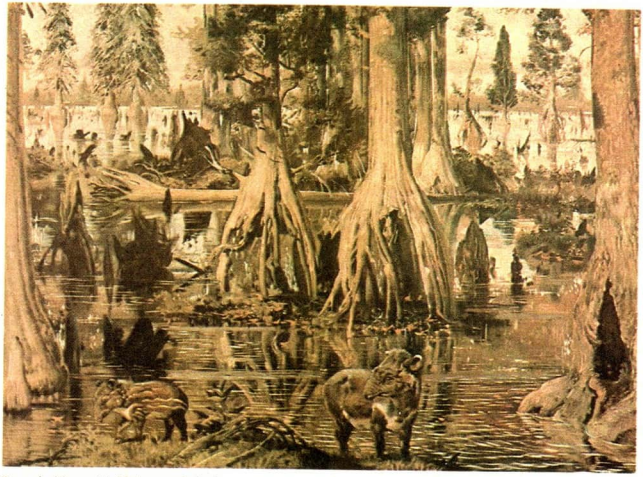
Mit Hilfe der photochemisch gewandelten Energie der kosmischen Strahlung wird Kohlenstoff von den autotroph lebenden Pflanzen aus dem Kohlendioxid der Luft assimiliert und so in organische Verbindungen eingebaut. Dabei handelt es sich in jedem Falle um einen endothermen Reduktionsprozeß, in dessen Verlauf Sauerstoff an die Umwelt abgegeben wird.

▶ *Durch die Photosynthese wird Kohlenstoff unter Energiebindung aus dem Kohlendioxid in organische Stoffe übergeführt; durch die Photosynthese wird Sauerstoff an die Umwelt abgegeben.*

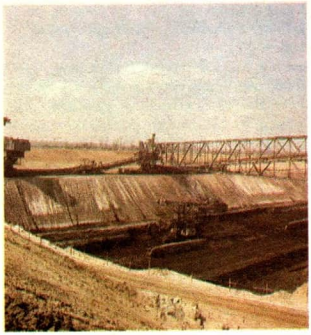
Die in den Vorgängen der Photosynthese in Assimilaten gebundene Energie kann durch Oxydationsprozesse (■ Atmung) wieder freigesetzt werden, wobei Kohlendioxid gebildet wird.

Der für diese Oxydationsvorgänge erforderliche Sauerstoff wird der Luft entzogen. Dagegen kommt es bei der Photosynthese zur Freisetzung von Sauerstoff im Verlaufe jener Reaktionen, die an die Photolyse des Wassers anschließen, wodurch der Sauerstoffgehalt der Luft konstant gehalten wird.

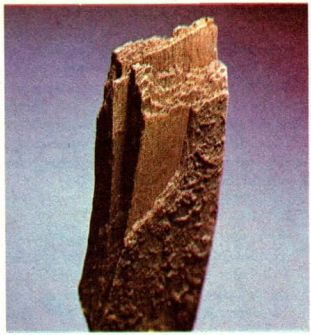
Reduktion von Kohlendioxid unter Energieaufwand bei der Photosynthese und Oxydation von Assimilaten bei der Atmung unter Bildung von Kohlendioxid und Energiefreisetzung bilden im Kreislauf der Stoffe auf der Erde zwischen lebender und nicht lebender Natur entscheidende Glieder.



Braunkohlenwald (Rekonstruktion)



Abbau von Braunkohle als Energielieferant in einem Tagebau



Braunkohle, in der die Holzstruktur noch deutlich erkennbar ist

Durch die Kohlendioxidassimilation werden in jedem Jahr etwa drei Prozent des Kohlendioxids der Luft und 0,3 Prozent des im Wasser der Ozeane gelösten Kohlendioxids in organische Verbindungen übergeführt.

Bei den gegenläufig wirkenden Oxydationsvorgängen von Lebewesen wird die gleiche Kohlendioxidmenge wieder an die Atmosphäre und in das Wasser zurückgeführt.

■ Die von Landpflanzen jährlich assimilierte Kohlenstoffmenge entspricht ungefähr 1300 kg Kohlenstoff je Hektar, das ergibt umgerechnet 20 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Die Masse des insgesamt von den Pflanzen des Festlandes und der Ozeane je Jahr assimilierten Kohlenstoffs wird auf etwa 150 Milliarden Tonnen geschätzt. Ein großer Anteil davon wird in der menschlichen Wirtschaft genutzt (■ Nahrungs- und Futtermittel, Holz- und Holzprodukte, Pflanzenfasern, industrielle Rohstoffe, Arzneimittel).

Bei der photosynthetischen Stoffproduktion werden je Jahr 13×10^{17} Joule an Energie in organischen Substanzen gebunden. Das entspricht, umgerechnet auf die Erdoberfläche, etwa 138 Joule/m^2, wobei jedoch jährlich 4×10^8 Joule/m^2 eingestrahlt werden.

Der bei der Photosynthese in chemische Energie überführte Anteil der eingestrahlten Energie ist also sehr gering. Diese Energie ist aber die energetische Basis für alle weiteren Lebensprozesse auf der Erde.

▶ *Die Photosynthese schafft die stoffliche und energetische Grundlage für alle Lebensprozesse der Organismen auf der Erde.*

Für Haushalt und Wirtschaft stellen Kohle und Erdöl gegenwärtig die wichtigsten Energiequellen dar.

Kohle entstand aus Pflanzen früherer erdgeschichtlicher Epochen (Karbon, Tertiär), während Erdöl aus Sedimenten von Mikroorganismen, die sich am Grund der damaligen Meere anreicherten, entstanden ist. Die heute zur Energiegewinnung genutzten organischen Stoffe der Kohle und des Erdöls sind Produkte der autotrophen Kohlenstoffassimilation vergangener Epochen. Autotrophe Kohlenstoffassimilation stellt deshalb auch die Basis für industrielle Rohstoffe und Energie dar, die gegenwärtig aus Kohle und Erdöl gewonnen werden.

Die Forschung hat die Aufgabe, fossile und gegenwärtige organische Rohstoffe immer rationeller nutzbar zu machen und außerdem die photosynthetische Stoffproduktion auf der nutzbaren Fläche der Erde immer weiter zu erhöhen. ①②

Ein Weg dazu ist die Züchtung von Pflanzen mit hoher Photosyntheseleistung. Große Hoffnungen werden auch darauf gesetzt, im Ergebnis einer immer eingehenderen Erforschung der photochemischen Prozesse der Photosynthese zu Erkenntnissen zu gelangen, deren Nachahmung eine neue wichtige industrielle Nutzung der Lichtenergie ergeben könnte. Die Lösung der beiden wichtigsten wirtschaftlichen Weltprobleme, des Welternährungs- und -energieproblems, ist eng mit der Erforschung der auf Photosynthese beruhenden pflanzlichen Stoffproduktion verbunden. ③④⑤

Chlorophyllhaltige Pflanzen und Bakterien assimilieren Kohlendioxid durch Photosynthese, die wichtigste Form der autotrophen Kohlenstoffassimilation auf der Erde.

Bei der Lichtreaktion bewirken Lichtquanten eine photochemische Reaktion, in deren Folge energiereiche Elektronen eine Kette von Redoxreaktionen durchlaufen, bei denen ATP und $NADPH_2$ gebildet werden. Sauerstoff wird freigesetzt.

ATP und $NADPH_2$ sind energiereiche chemische Verbindungen, mit deren Hilfe die photochemisch umgesetzte Lichtenergie für die Reduktion des Kohlendioxids verwendet werden kann.

Die Produkte der autotrophen Kohlenstoffassimilation heißen Assimilate. Es sind vor allem Kohlenhydrate.

Die Photosynthese vollzieht sich in den Chloroplasten höherer Pflanzen, wo neben Kohlenhydraten auch Fette und Eiweiße gebildet werden können.

Die photosynthetische Leistung einer Pflanze hängt von inneren Faktoren (■ Chlorophyll, Entwicklungszustand) ab. Sie wird außerdem wesentlich von äußeren Faktoren in der Umwelt beeinflußt (■ Licht, Kohlendioxid der Luft, Wasser, Temperatur).

Die autotrophe Assimilation von Kohlendioxid, in erster Linie die Photosynthese, ist jener Prozeß, durch den der Organismenwelt auf der Erde ständig Substanz und Energie zugeführt werden. Die Photosynthese ist deshalb die heutige Grundlage des Lebens auf der Erde.

① Weisen Sie nach, wie durch moderne Technologien pflanzliche Rohstoffe verlustärmer genutzt werden können! Nutzen Sie dazu auch Ihre Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 11!

② Nennen Sie Möglichkeiten, die Photosyntheseleistung von Nutzpflanzen der Land- und Forstwirtschaft zu steigern!

③ Versuchen Sie an Beispielen zu erklären, wie die Erforschung der Photosynthese zur Lösung der wichtigsten wirtschaftlichen Probleme der Menschheit beitragen könnte!

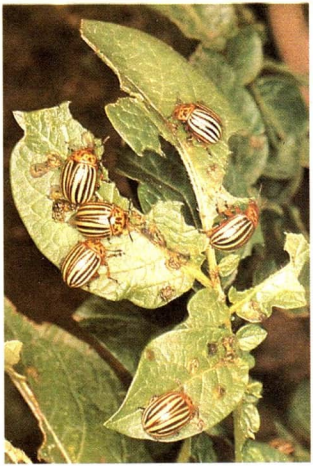
④ Erläutern Sie die lebenswichtige Bedeutung grüner Pflanzen, die nicht zu den Kulturpflanzen gehören!

⑤ Begründen Sie die Notwendigkeit der Anlage von Grünpflanzungen in dicht besiedelten Gebieten!

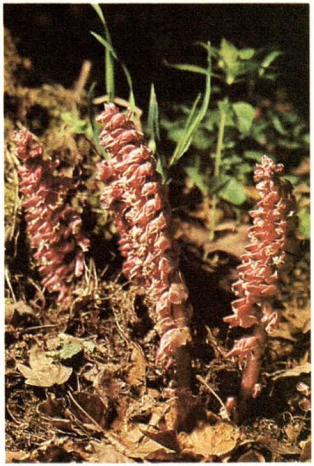
⑥ Erläutern Sie die Begriffe Konsumenten 1., 2. und 3. Ordnung! Nennen und begründen Sie die in dieses Bezugssystem passende Bezeichnung für autotrophe Organismen!

⑦ Erläutern Sie den Begriff Reduzenten! Setzen Sie ihn in Beziehung zu dem Begriff heterotrophe Assimilation!

Heterotrophe Assimilation



Kartoffelkäfer



Schuppenwurz

Alle Tiere, die meisten Bakterien und alle chlorophyllfreien Pflanzenzellen sind an die Assimilation körperfremder organischer Stoffe und der in diesen gebundenen Energie angepaßt.

Die von autotroph assimilierenden Organismen gebildeten organischen energiereichen Substanzen sind Ausgangsstoffe für die Stoffwechselvorgänge heterotroph assimilierender Organismen.

Heterotrophe Assimilation ist die Aufnahme körperfremder organischer Substanz und deren Umwandlung in körpereigene Stoffe.

Der Aufbau organischer Substanzen aus anorganischen Stoffen verläuft bei allen autotrophen Organismen in wesentlichen Schritten gleich; innerhalb dieser Einheitlichkeit aber äußert sich die Vielfalt der lebenden Welt in zahlreichen, mehr oder weniger stark ausgeprägten Abwandlungen in der Zusammensetzung und Menge der jeweiligen organischen Substanzen beim Aufbau körpereigener Stoffe. So steht, entsprechend der Vielfalt autotropher Organismen, den heterotrophen Organismen eine Vielzahl an organischen Stoffen für die Assimilation zur Verfügung. Zahlreiche Tiere und Bakterien sowie einige Pflanzenarten nehmen als Konsumenten 2., 3. und 4. Ordnung keine Pflanzennahrung auf, sondern assimilieren tierische organische Stoffe. Einige Arten, besonders unter den Bakterien und Pilzen, ernähren sich auch als Reduzenten. ⑥⑦

Im Verlaufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung haben sich in Angepaßtheit an das unterschiedliche Nahrungsangebot Nahrungsspezialisten herausgebildet. Ihnen gemeinsam ist

die heterotrophe Assimilation nur organischer Stoffe, sie unterscheiden sich zum Teil erheblich in dem Vermögen, bestimmte organische Stoffe für die Assimilation in ihrem Stoffwechsel auszuwählen. Dabei sind sie sowohl in der Ausprägung physiologischer Merkmale (■ Art und Anzahl der Verdauungsenzyme) als auch anatomisch-morphologischer Merkmale (■ Bau der Verdauungsorgane, Schnabelform, Gebißtyp) ihrer jeweiligen Nahrung angepaßt. ①

► *Heterotrophe Organismen ernähren sich von Pflanzen oder Tieren, wobei für jede Sippe die Art der Nahrung in bestimmten, mehr oder weniger engen Grenzen festliegt.*

■ Zu den ausgeprägten Nahrungsspezialisten gehören viele Insekten; zum Teil nehmen Larven oder Vollinsekten nur eine Pflanzenart als Futterpflanze an (↗S. 59). Auch parasitisch oder saprophytisch lebende Tiere oder Pflanzen sind oft eng an eine Wirtspflanze oder ein Wirtstier gebunden (↗S. 59). ②③

Der Mensch ist ein Allesfresser; er braucht für seine Ernährung sowohl tierische als auch pflanzliche Substanzen. Dabei sind die Stoffe, die in erster Linie zu Energieträgern für die eigenen Lebensprozesse (■ Stoffwechsel, Wachstum) umgebaut werden, insbesondere Kohlenhydrate und Fette, weitgehend gegeneinander austauschbar. Stoffe dagegen, die für den Aufbau von körpereigenen Substanzen assimiliert werden, müssen in bestimmter, dem jeweiligen Bedarf entsprechender Menge in der Nahrung vorhanden sein.

■ Ebenso wie autotrophe Pflanzen bestimmte anorganische Stickstoffverbindungen aus dem Boden aufnehmen müssen, braucht der Mensch eine Mindestzufuhr von Eiweißen, denen er Aminosäuren zur Synthese körpereigener Eiweiße entnimmt. Die Höhe dieses Eiweißbedarfs ist je nach Alter und Belastung unterschiedlich.

► *Heterotrophe Organismen müssen eine Reihe von lebensnotwendigen organischen Verbindungen, die sie in ihrem eigenen Stoffwechsel nicht synthetisieren können, mit der Nahrung aufnehmen.*

Zu den essentiellen, lebensnotwendigen Stoffen, die heterotrophe Organismen aufnehmen müssen, gehören einige Fettsäuren (■ Linolsäure), die meisten Aminosäuren (■ Lysin, Leuzin, Isoleuzin, Valin) sowie die Vitamine (■ Vitamin A, B_1, B_{12}, C). Sie werden in der Regel in Form von hochmolekularen Nährstoffen aufgenommen.

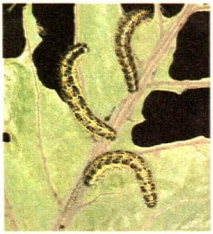
Heterotrophe Assimilation bei Tieren und beim Menschen. Die heterotrophe Assimilation bei Tieren läuft in einer Reihe von schrittweise einander folgenden Vorgängen ab:
— die Aufnahme der Nahrungsstoffe, sie kann osmotisch über die gesamte Zell- oder Körperoberfläche (■ bei Einzellern, bei Bandwürmern) erfolgen, in der Regel sind spezielle Organe zur Nahrungsaufnahme ausgebildet (■ Mundwerkzeuge bei Insekten, Schnabel- und Maulbildung bei Wirbeltieren);
— die Verdauung, sie ist die Umwandlung der Nahrung in resorbierbare Stoffe, sie umfaßt die mechanische Zerkleinerung von Nahrungsbrocken (■ Kauen, Zerreiben) sowie den chemischen Abbau der hochmolekularen Nahrungsstoffe in niedermolekulare Verbindungen — meist durch Hydrolyse — auf enzymatischem Wege; bei Innenparasiten entfällt dieser Schritt in der Regel, da bereits verdaute Stoffe aufgenommen werden; ④

① Nennen Sie drei Beispiele für Nahrungsspezialisten bei Säugetieren! Nennen Sie jeweils die Art der Nahrung und Angepaßtheiten im äußeren oder inneren Bau!
② Erläutern Sie die Begriffe Parasiten und Saprophyten! Vergleichen Sie beide Gruppen! Nutzen Sie Ihre Kenntnisse aus dem Biologie-Unterricht der Klasse 11!
③ Erläutern Sie die Bedeutung der Nahrungsspezialisten für die Aufrechterhaltung des biologischen Gleichgewichts!
④ Muß Traubenzucker verdaut werden? Begründen Sie Ihre Antwort!

Nahrungsspezialisten in unterschiedlichen Organismengruppen

Lilienhähnchen
Nur an Lilienarten

Gespinst des Apfelwicklers
Larve in Kern- und Steinobst, vorwiegend in Äpfeln



Kleiner Kohlweißling
Larve nur an Kreuzblütengewächsen, vorwiegend Kohl

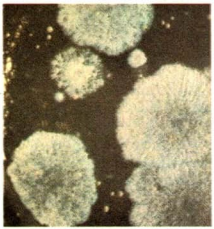
Stockente
Erfaßt Nahrung durch Gründeln
Schnabel breit, mit Siebleisten

Schwarzstorch, ▼
Schnabel mit scharfen Rändern und Spitze

Grünling, ▼
Körnerfresser
Schnabel dick, kräftig und kurz

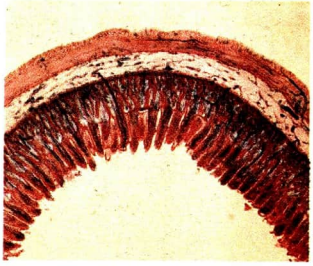
Fischegel
Nur an Fischen, besonders Karpfen

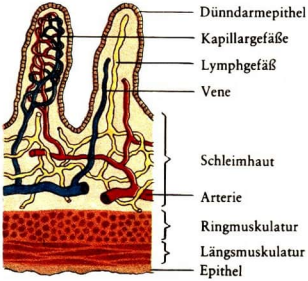
Blutegel
An Säugetieren, selten an Lurchen



Penicillium
Befällt tote organische Substanz

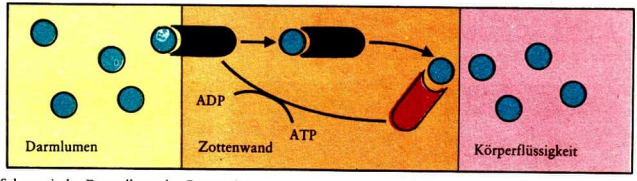
— die Resorption, sie ist die Aufnahme der niedermolekularen Verbindungen in bestimmten Teilen der Verdauungsorgane (■ Darmzotten) durch die Wand in Körperflüssigkeiten (■ Blut, Lymphe), von denen die Verbindungen zu den Orten des Verbrauchs (■ Biosynthese körpereigener Stoffe) transportiert werden. Die Resorption verläuft in der Regel parallel mit den Verdauungsvorgängen; dadurch wird eine zu starke Konzentrationserhöhung der niedermolekularen Verbindungen in den Verdauungsorganen und ein Verschieben des Gleichgewichts zwischen Ausgangsprodukten und Reaktionsprodukten vermieden, was aufgrund des Massenwirkungsgesetzes zu einer Verzögerung der Verdauungsvorgänge führen könnte. ①





Zotten in der Dünndarmwand (100 : 1)

Die Resorption erfolgt größtenteils unter Beteiligung von Trägersubstanzen sowie unter Energiebindung aktiv entgegen dem Konzentrationsgefälle. Sie wird (■ beim Menschen) durch Kontraktion der Darmzotten unterstützt.



Schematische Darstellung der Resorption

Die Ausscheidung vom Körper nicht verwertbarer oder unverträglicher Bestandteile der Nahrung erfolgt in der Regel durch direkte Abgabe aus dem Körper (■ durch Exkretionsvakuolen, durch den After).

Verdauung der Kohlenhydrate. Die autotrophen Organismen sind in der Lage, eine große Anzahl verschiedener Kohlenhydrate zu synthetisieren. Einige davon (■ Monosaccharide) können von heterotrophen Organismen direkt resorbiert und in ihren Stoff- und Energiewechsel einbezogen werden.

Hochmolekulare Kohlenhydrate dagegen müssen mit Hilfe hydrolytisch wirkender Enzyme (■ Karbohydrasen) erst in ihre Bausteine zerlegt werden. In einigen Tiergruppen erfolgt dieser Abbau zu resorbierbaren Verbindungen mit Hilfe von symbiontischen Mikroorganismen, vorwiegend Bakterien.

Unter den Polysacchariden haben für die Ernährung der Tiere nur Stärke, Glykogen und Zellulose Bedeutung. Bei der Aufspaltung dieser Stoffe spielen die Amylasen — stärkeabbauende Enzyme — die größte Rolle (■ Mundspeichel-Amylase, Bauchspeichel-Amylase, ↗ S. 62). Die Amylasen aller Tiere sind einander sehr ähnlich. ②

Zellulosespaltende Enzyme, Zellulasen, werden nur von wenigen Tieren gebildet. Symbiontische Mikroorganismen, die eine Zersetzung der Zellulose bewirken, kommen bei Tieren dagegen relativ häufig vor. ③

■ Bei einigen Säugetieren sind besondere Organabschnitte zu einer Art „Gärkammer" umgebildet, in der die Pflanzenfasern unter Mitwirkung von Mikroorganismen abgebaut werden (■ Wiederkäuermagen, Dickdarm des Pferdes, Blinddarm einiger Nagetiere).

Die Mikroorganismen entwickeln sich in der Regel in einem Abschnitt des Darms, der hinter dem Wirkungsort der eiweißspaltenden Enzyme des Wirtes liegt. Infolgedessen kann der Wirt die Mikroorganismen nicht als Nährstoffe verwerten. Lediglich die durch ihre Tätigkeit freigesetzten oder produzierten Substanzen werden vom Wirt absorbiert.

Die im Verlaufe der Verdauung aus hochmolekularen Kohlenhydraten abgespaltenen Monosaccharide werden in der Regel über Trägersubstanzen, selten nur durch Diffusion, resorbiert.

Verdauung der Eiweiße. Eiweiße werden bei der Verdauung in ihre Grundbausteine, die Aminosäuren, zerlegt. Diese werden danach unter Beteiligung spezifischer Trägersubstanzen resorbiert und können zum Aufbau der artspezifischen Proteine dienen. Die Eiweißverdauung ist eine in Etappen erfolgende Hydrolyse der Peptidbindungen. ④

Zu den Proteasen gehören vor allem die Enzyme Pepsin und Trypsin. Pepsin kommt ausschließlich bei Wirbeltieren vor. Es ist das charakteristische eiweißspaltende Enzym des Wirbeltiermagens. Seine Aktivierung erfolgt im sauren Medium autokatalytisch. Die vom Magen abgeschiedene Salzsäure ist für die Aktivierung des Pepsins von Bedeutung. Gleichzeitig stellt sie auch das erforderliche *p*H-Optimum, welches zwischen 1,0 und 3,0 liegt, ein.

Zu den Proteasen, die im schwach basischen Bereich ihr Wirkungsoptimum haben, gehört das Trypsin der Bauchspeicheldrüse. Es wird in Form einer unwirksamen Vorstufe, des Trypsinogens, abgeschieden und durch ein Enzym der Darmschleimhaut (die Enterokinase) in Trypsin übergeführt.

Verdauung der Fette. Die Fette sind Ester aus Monokarbonsäuren und Glyzerin (Propantriol). Sie können zum Teil, in Form kleiner Tröpfchen emulgiert, von Zellen aufgenommen und intrazellulär abgebaut werden. Meist erfolgt aber eine Hydrolyse der Fette im Darmkanal unter Mitwirkung fettspaltender Enzyme, der Lipasen.

① Nennen Sie die Aussage des Massenwirkungsgesetzes! Schildern Sie an einem Beispiel seine Wirkung in biologischen Systemen!

② Weisen Sie in einem Experiment die enzymatische Wirkung von Ptyalin oder Pankreassaft auf Stärke nach! Verwenden Sie als Nachweisreagenzien Jod-Kaliumjodid-Lösung und Fehlingsche Lösung!

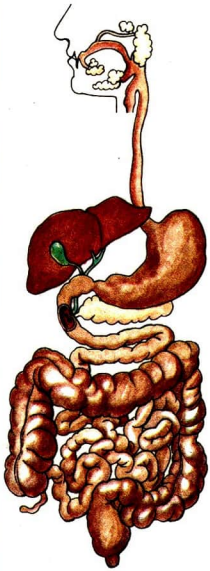
③ Nennen Sie zellulosespaltende Symbionten im Verdauungskanal von Wirbeltieren! Nutzen Sie Ihre Kenntnisse aus dem Biologieunterricht in der Klasse 11!

④ Erläutern Sie anhand der Strukturformel eines Dipeptids die Hydrolyse einer Peptidbindung! Benutzen Sie dazu den Wissensspeicher Chemie, Seite 193!

Die wichtigste Lipase der Wirbeltiere wird in der Bauchspeicheldrüse gebildet. Ihre Aktivierung erfolgt durch Gallensalze, die gleichzeitig die Emulgierung der Fette erleichtern.

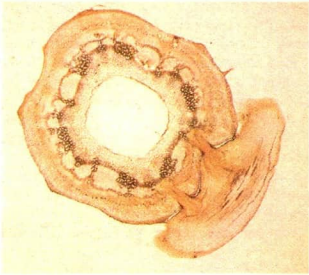
Die beim enzymatischen Fettabbau entstehenden niederen Monokarbonsäuren und Glyzerin können über Trägersubstanzen die Wand der Darmzotten passieren und ins Blut gelangen; höhere Monokarbonsäuren bilden mit Glyzerin leichter lösliche Verbindungen, die dann resorbiert werden können.

Verdauungswege beim Menschen



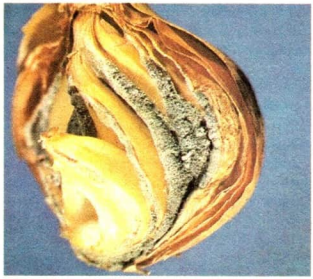
Organ	Wichtigste Enzyme u. a. Substanzen	Wirkung
Speicheldrüsen	Ptyalin	Stärke → Disaccharide
Lippen, Zähne, Zunge		Nahrungsvorwahl, mechanische Zerkleinerung
Magen	Pepsin HCl	Eiweiß → Polypeptide Aktivierung, *p*H-Optimierung
Leber		
Gallenblase	Galle (Abgabe in Zwölffingerdarm)	Fettemulgierung
Zwölffingerdarm	Enterokinase	
Bauchspeicheldrüse	Trypsin Amylase, Maltase Lipase (Abgabe in Zwölffingerdarm) $NaHCO_3$	Eiweiß → Polypeptide → Aminosäuren Stärke → Disaccharid → Monosaccharid Fett → Fettsäure und Glyzerin Neutralisierung
Dünndarm	Maltase Erepsin	Maltose → Glukose Polypeptid → Aminosäuren Resorption der verdauten Nahrung
Dickdarm	—	Flüssigkeitsentzug
Mastdarm	—	Flüssigkeitsentzug
After	—	Kotausscheidung

Seide auf Küchenzwiebel (2 : 1)



Saugwurzel von Seide in der Wirtspflanze (10 : 1)

Fichtenspargel



Schimmelpilz auf Küchenzwiebel (2 : 1)

Brandpilz in Roggenähre (Mutterkorn) (3 : 1)

Hutpilz auf altem Holz (Stockschwamm)

Heterotrophe Assimilation bei Pflanzen. Auch außerhalb des Tierreichs kommt heterotrophe Ernährungsweise vor. Heterotroph ernähren sich alle Pilze, die Mehrzahl der Bakterien sowie unter den Pflanzen einige Algen und einige Samenpflanzen. Auch die chlorophyllfreien Zellen autotropher Pflanzen (■ Wurzelzellen) müssen organische Kohlenstoffverbindungen aufnehmen. Bei diesen sind es in der Regel die Assimilate, die durch Photosynthese in den grünen Zellen des Individuums gebildet werden und die durch Osmose oder durch Stofftransport in bestimmten Leitgeweben zu den betreffenden Zellen oder Organen gelangen.

Für heterotrophe Pflanzen sind als Nährsubstrate vor allen Dingen organische Kohlenstoffverbindungen von Bedeutung. Fette und Eiweiße können sie aus den assimilierten Kohlenstoffverbindungen und anorganischen Nährsalzen (■ Nitrate, Phosphate) selbst aufbauen. Die meisten heterotrophen Pflanzen gedeihen auf anorganischen Substraten mit einer organischen Kohlenstoffquelle.

Schimmelpilze gedeihen gut auf künstlichen anorganischen Nährböden, wenn diesen Glukose zugesetzt wird.

Von heterotrophen Pflanzen können auch Proteine und andere hochmolekulare Substrate als Kohlenstoffquelle genutzt werden. Von den Zellen werden meist hydrolytisch wirkende Enzyme nach außen abgegeben, die außerhalb des Organismus auf das Substrat einwirken; die entstehenden Spaltprodukte (■ Aminosäuren) werden dann von den Zellen aufgenommen und in den Stoffwechsel der betreffenden Organismen eingebaut. Auf diese Weise werden auch sehr schwer zersetzbare Substanzen (■ Zellulose, Lignin, Humusstoffe) aufgeschlossen.

▶ *Heterotrophe Pflanzen leben als Parasiten oder Saprophyten.* ①②

Unter den Samenpflanzen gibt es auch eine Reihe von Arten, die zwar Chlorophyll enthalten und dadurch kohlenstoffautotroph sind, aber Wasser, Nährsalze oder organische Stickstoffverbindungen anderen Organismen entziehen (■ Mistel).

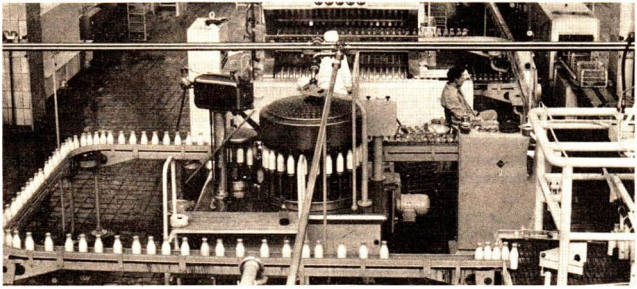
Sonnentau ist kohlenstoffautotroph, gewinnt aber am natürlichen Standort, meist stickstoffarme Hochmoore, den nötigen Stickstoff dadurch, daß durch nach außen abgegebene Enzyme Eiweißverbindungen von Insekten verdaut werden (stickstoffheterotroph). Bei ausreichender Stickstoffdüngung können diese Pflanzen auch ohne „Insektenverdauung" leben. ③

▶ Heterotroph lebende Organismen nehmen energiereiche hochmolekulare organische Verbindungen auf, sie können sie nicht selbst aus anorganischen Verbindungen synthetisieren. Die aufgenommenen Stoffe werden in der Regel mit Hilfe von Enzymen in ihre Grundbausteine zerlegt, ehe sie in dem Stoffwechsel des betreffenden Organismus umgesetzt werden.

Zu den heterotrophen Lebewesen gehören außer dem Menschen und den Tieren auch Vertreter saprophytisch oder parasitisch lebender Bakterien, Pilze und Sproßpflanzen.

① Erläutern Sie die Bedeutung von saprophytischen Pflanzen im Stoffkreislauf!
② Erläutern Sie anhand der auf Seite 63 abgebildeten Pflanzen positive und negative Wirkungen heterotropher Pflanzen auf die Volkswirtschaft!
③ Begründen Sie, warum Mistel und Sonnentau nicht als heterotrophe Pflanzen bezeichnet werden können!

Dissimilation



Produktionshalle einer modernen Molkerei

Bei der Assimilation werden körperfremde in körpereigene Stoffe umgewandelt; die Dissimilation ist der gegenläufige Prozeß.

▶ *Dissimilation ist der Abbau körpereigener Stoffe unter Freisetzung von Energie.*

Die Dissimilation kann vollständig als Atmung oder unvollständig als Gärung verlaufen.

▶ *Atmung ist der vollständige Abbau körpereigener energiereicher Stoffe.*

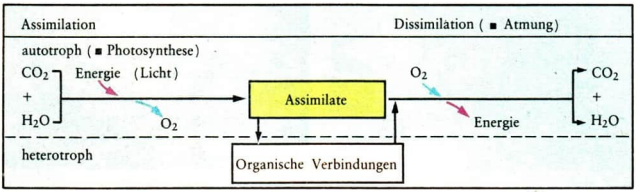
Im Verlaufe der Atmung entstehen am Ende anorganische Verbindungen. Aus Kohlenhydraten oder Fetten werden dabei Kohlendioxid und Wasser gebildet; bei Eiweißen entsteht daneben Ammoniak, das jedoch in der Regel gebunden oder ausgeschieden wird, da es ein Zellgift ist.

▶ *Gärung ist der unvollständige Abbau körpereigener energiereicher Stoffe; sie erfolgt meist unter Luftabschluß.*

Gärung führt zu niedermolekularen organischen Verbindungen (■ Äthanol, Milchsäure, Essigsäure).

Atmung und Gärungen bewirken nicht nur den vollständigen oder unvollständigen Abbau von Stoffen, sondern gleichzeitig auch die vollständige oder teilweise Freisetzung der Energie dieser Stoffe. Die dissimilatorische Energiefreisetzung bildet die universelle Form der Energiebereitstellung in den Zellen aller Lebewesen.

Die Dissimilation ist insgesamt die Umkehrung der Assimilation, wenn sich beide Prozesse auch in Teilschritten unterscheiden.



Atmung

► *Die Atmung ist die häufigste und wichtigste Form der Dissimilation bei den Lebewesen.*

Bei der Atmung wird Sauerstoff aufgenommen und Kohlendioxid abgegeben. Die Sauerstoffbedürftigkeit ist ein äußeres Kennzeichen dafür, daß die Atmung ein Oxydationsvorgang ist. Das äußerlich nachweisbare Oxydationsprodukt ist Kohlendioxid, während Wasser als Oxydationsprodukt meist nicht äußerlich nachweisbar ist.

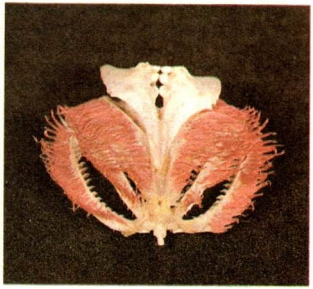
Sauerstoffbedürftigkeit und Kohlendioxidbildung bedingen bei der Atmung einen Gasaustausch, der demjenigen der autotrophen Assimilation gegenläufig ist. Sauerstoff muß aufgenommen und Kohlendioxid abgegeben werden. Diese äußere Atmung umfaßt alle Vorgänge beim Austausch der Atemgase, die eigentlichen oxydativen Dissimilationsvorgänge vollziehen sich innerhalb der Zellen, sie bilden die innere Atmung oder Zellatmung.

Gasaustausch. Der Sauerstoff wird von den Lebewesen aus ihrer Umgebung aufgenommen. Da sich Sauerstoff im Gegensatz zu Kohlendioxid schlecht in Wasser löst, kann die Sauerstoffversorgung für Lebewesen im Wasser Schwierigkeiten bereiten. Die Menge gelösten Sauerstoffs nimmt mit steigender Temperatur und mit zunehmender Tiefe der Gewässer ab. Am Boden von Seen und Meeren kann freier Sauerstoff völlig fehlen, so daß es zu Gärungsprozessen durch anaerobe Lebewesen (■ Bakterien) kommt.

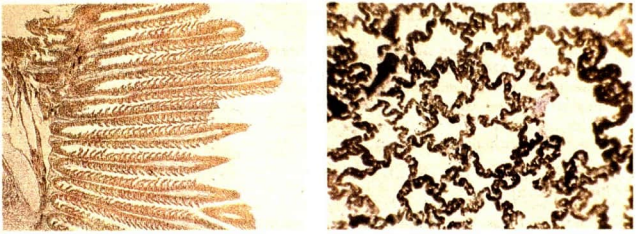
Sauerstoffgehalt des Wassers bei Luftsättigung			
Süßwasser		Meerwasser	
5 °C	9,2 ml/l	5 °C	6,9 ml/l
20 °C	6,5 ml/l	20 °C	5,1 ml/l

Die Sauerstoffversorgung in Gewässern wird in wachsendem Maße auch durch die Anreicherung von Industrie- und Haushaltsabwässern mit schädlichen Chemikalien beeinträchtigt. Einerseits werden dadurch das Lösungsvermögen und die physikalische Sauerstoffzufuhr

Wasserhahnenfuß



Kiemenapparat eines Karpfens



Kiemenblättchen eines Fisches, Längsschnitt (150 : 1, links); Säugetierlunge, Querschnitt (300 : 1)

direkt vermindert, andererseits sterben autotrophe Lebewesen der Gewässer ab (Algen, Wasserpflanzen), deren Photosynthese eine wichtige Sauerstoffquelle für die Gewässer darstellt. Neben der Entwertung des Brauch- und Trinkwassers wird das Gewässer als wichtiger Lebensraum für die Produzenten von Sauerstoff und von Nahrung für die Menschen zerstört. Die Reinhaltung der Gewässer und Meere ist deshalb eine lebenswichtige Aufgabe für die Gesellschaft und für jeden einzelnen Menschen.

Nur sehr kleine oder dünnflächig ausgebildete Lebewesen (■ Algen, Einzeller) können ohne besondere Transportsysteme für Sauerstoff leben. Sie nehmen den Sauerstoff gasförmig oder in Wasser gelöst durch die Körperoberfläche auf. Der Transport zu den Zellen und innerhalb der Zellen erfolgt dann durch Diffusion.

Landpflanzen nehmen Sauerstoff aus der Luft auf. Durch die Spaltöffnungen stehen die Interzellularen mit der Außenluft in Verbindung, aus den Interzellularen diffundiert der Sauerstoff in die Zellen hinein. ①②③

Bei einigen Tieren (■ Regenwurm) findet der Austausch von Atemgasen ausschließlich über die Körperoberfläche statt; bei den meisten Tierarten sind aber spezielle Atemorgane ausgebildet. Die Zelloberflächen, an denen der Gasaustausch stattfindet, sind bei höher entwickelten Tieren (■ in Tracheen, Lungen) ebenso wie bei höheren Sproßpflanzen (■ in Interzellularen) in der Regel in das Körperinnere verlagert, und meist sind die aufnehmenden Oberflächen stark vergrößert. ④⑤

Bei Tieren spielen besondere Transportsysteme (■ Blutkreislauf, roter Blutfarbstoff) eine wichtige Rolle für die Verteilung des Sauerstoffs im Körper und für den Stofftransport von Kohlendioxid zu den Austauschoberflächen der Atemorgane. In Phasen sehr starker Arbeit kann die Sauerstoffzufuhr zu Muskelzellen dennoch nicht ausreichen, um den Bedarf der damit verbundenen intensiven Oxydationsprozesse (Atmung) zu decken (↗ S. 114).

① Erklären Sie, warum bei Wasserpflanzen (■ Wasserhahnenfuß) die Unterwasserblätter häufig stärker zerteilt sind als die Laubblätter über dem Wasser! Begründen Sie Ihre Meinung!

② Beschreiben Sie den Gasaustausch bei Moospflanzen! Nutzen Sie dazu Ihre Kenntnisse über den Bau von Pflanzensippen aus der Klasse 11!

③ Erklären Sie, warum bei Schwimmblättern von Wasserpflanzen (■ Seerose) die Spaltöffnungen nicht an der Blattunterseite, sondern verstärkt an der Blattoberseite liegen!

④ Stellen Sie Beziehungen her zwischen der unterschiedlichen Ausbildung von Atemorganen und dem Lebensraum der Tiere (■ Regenwurm, Biene, Frosch, Eidechse)!

⑤ Erläutern Sie das Prinzip der Oberflächenvergrößerung an Beispielen tierischer Atmungsorgane!

Die Biochemie der inneren Atmung

Ausgangsstoffe der Atmung sind energiereiche organische körpereigene Verbindungen; auf ihren oxydativen Abbau, die biologische Oxydation, wirken äußere Faktoren, insbesondere der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt des umgebenden Milieus, aber auch Temperatur und Feuchtigkeit, ein. Die Atmungsvorgänge laufen in ihren wesentlichen Schritten in den Mitochondrien der Zellen ab (↗ S. 15); sie sind exotherm.

Die Summengleichung der Atmung

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 12\,H_2O$$
$$\Delta H = -2\,822\ \mathrm{kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1}$$

bringt nur Ausgangs- und Endsituation zum Ausdruck, zwischen denen aber zahlreiche chemische Teilreaktionen ablaufen. Diese können im wesentlichen als Umkehrung von Teilschritten der Assimilation (↗ S. 41f.) angesehen werden.

In Umkehrung der Bildung hochmolekularer Assimilate als Endphase der Assimilation werden vor Beginn der eigentlichen oxydativen Prozesse der Atmung hochmolekulare Stoffe (Stärke, Fett, Eiweiß) durch Einwirkung hydrolytisch wirkender Enzyme in ihre Bausteine zerlegt (■ Glukose, Glyzerin und Äthansäurereste, Aminosäuren), wobei der mögliche Energiegewinn dem Aufwand entspricht, der für die Synthese erforderlich war. In vielen Fällen (■ Stärkeabbau durch Amylase, Eiweißabbau) geht diese Energie für den Stoffwechsel sogar verloren.

Die niedermolekularen organischen Abbauprodukte — die eigentlichen Atmungssubstrate — werden in zwei Schritten, der Glykolyse und dem Säurekreislauf, zu Kohlendioxid und Wasserstoff oxydiert. Dazu werden die Atmungssubstrate durch Reaktion mit Phosphorsäureresten, die vom ATP übertragen werden, aktiviert (↗ S. 42) und gelangen in einen reaktionsbereiten Zustand. Aminosäuren werden zuerst in stickstofffreie Verbindungen übergeführt, ehe sie weiter abgebaut werden können.

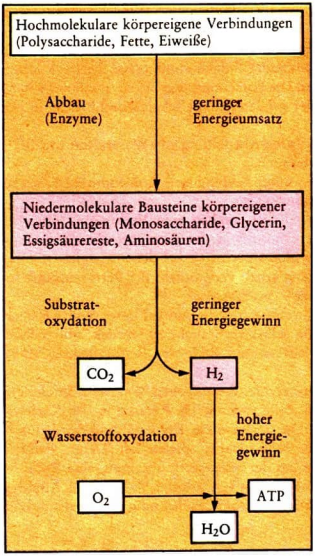
Den letzten Schritt der Atmung bildet die Oxydation des Wasserstoffs zu Wasser, wobei Luftsauerstoff benötigt wird und die hauptsächliche Energieübertragung auf ATP abläuft.

In ähnlicher Weise wie bei den Redoxreaktionsketten in der Lichtreaktion der Photosynthese ist bei der Atmung mit der Oxydation des Wasserstoffs die Bildung von ATP, das heißt eine Energiespeicherung, verbunden. Der Luftsauerstoff reagiert nicht mit den eigentlichen Atmungssubstraten (■ Glukose), sondern mit Wasserstoff, der im Verlaufe der Substratzerlegung zu Kohlendioxid freigesetzt wird. Die biologische Oxydation des Wasserstoffs steht am Ende der Atmung und wird deshalb auch als Endoxydation bezeichnet. ①

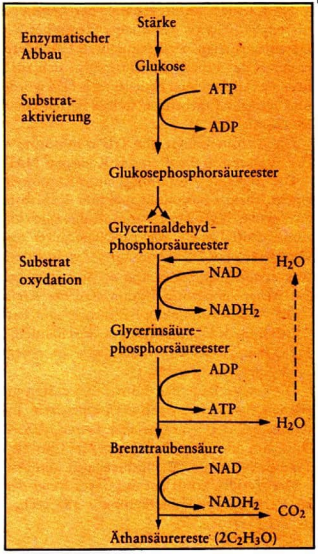
Die Atmung umfaßt mehrere Teilschritte. Nach dem Abbau hochmolekularer Verbindungen zu Atmungssubstraten (■ Glukose) erfolgt im Verlauf von Glykolyse und Säurekreislauf unter Enzymeinwirkung der schrittweise Abbau der Atmungssubstrate zu Kohlendioxid und Wasserstoff und anschließend die Oxydation des Wasserstoffs mit gleichzeitiger Energiespeicherung in ATP.

Glykolyse. Nach der enzymatischen Zerlegung der häufigsten Ausgangsstoffe der Atmung (■ Glykogen der Tiere, Stärke der Pflanzen) in die Monosaccharidbausteine (■ Glukose) und deren Aktivierung durch Übertragung von Phosphorsäureresten aus dem ATP bildet der Phosphorsäureester der Glukose das eigentliche Atmungssubstrat. Nach dem Abbau dieser Verbindung wird der erste Teilschritt der Atmung Glykolyse genannt.

Je ein Molekül Glukosephosphorsäureester wird dabei über Zwischenreaktionen in 2 Moleküle Glyzerinaldehydphosphorsäureester zerlegt. Diese Verbindung wird oxydiert und die Phosphorsäurereste werden auf ADP übertragen, es entstehen ATP und Wasserstoff.



Teilschritte der vollständigen Dissimilation



Teilschritte der Atmung bis zur Glykolyse

Ebenso wie bei der Photosynthese wird der Wasserstoff an Koenzyme der wasserstoffübertragenden Enzyme gebunden (■ in $NADPH_2$).

In einigen Folgereaktionen werden über die Bildung von Brenztraubensäure (2-Oxopropansäure) und nach Abspaltung von Wasserstoff und Kohlendioxid Äthansäurereste gebildet (Essigsäurereste), die, an ein Koenzym gebunden, in einem weiteren Teilschritt, dem Säurekreislauf, vollständig oxydiert werden. ②

Säurekreislauf. Die vollständige Oxydation des Äthansäurerestes geschieht in einem Kreisprozeß von Reaktionen. Der Äthansäurerest wird zuerst an ein Akzeptormolekül mit vier Kohlenstoffatomen (Dikarbonsäure) gebunden. Das Reaktionsprodukt ist die Zitronensäure, die dem Reaktionskreislauf unter anderem den Namen Säurekreislauf („Zitronensäure-Zyklus") gegeben hat.

① Begründen Sie anhand der Abbildung Seite 69 links, daß der Verlauf der Atmung in wesentlichen Schritten als Umkehrung der Assimilation angesehen werden kann! Vergleichen Sie jeweils Ausgangsstoffe und Endprodukte beider Prozesse!

② Nennen Sie die Gruppenbezeichnungen von mindestens drei Enzymgruppen, die an den Teilschritten der Glykose beteiligt sein müssen!

Nach seinem Entdecker wird der Zyklus auch Krebs-Zyklus genannt. Hans KREBS, ein 1933 ins englische Exil getriebener deutscher Biochemiker, hat für diese Entdeckung den Nobelpreis erhalten. Sie hat dadurch besondere Wichtigkeit, daß mit dem Zitronensäurezyklus erstmals das Prinzip kreisförmig in sich zurücklaufender Folgen von Stoffwechselreaktionen in seiner allgemeinen Bedeutung erfaßt worden ist. Die Forschungsergebnisse von Hans KREBS und seinen Mitarbeitern stellen deshalb einen der großen gedanklichen Durchbrüche in der Biochemie dar.

Die Zitronensäure, eine Trikarbonsäure, wird durch Abspaltung von Wasserstoff oxydiert. Der Wasserstoff wird an das Koenzym NAD gebunden.

Die folgende Abspaltung eines Karboxylrestes unter Bildung von Kohlendioxid führt zu einem Reaktionsprodukt mit fünf Kohlenstoffatomen.

Erneute Wasserstoff- und Kohlendioxid-Abspaltung ergeben eine Verbindung mit vier Kohlenstoffatomen, die Bernsteinsäure. Sie ist ebenso wie der Akzeptor für die Äthansäurereste eine Dikarbonsäure. Zwei weitere Oxydationsschritte, bei denen jeweils zweimal Wasserstoff abgegeben und an Koenzym gebunden wird, verwandeln die Bernsteinsäure in den Akzeptor zurück. Damit wird der Kreisprozeß geschlossen.

Die Akzeptormoleküle können erneut Essigsäurereste binden und bei deren vollständiger Oxydation den Säurekreislauf durchlaufen, ohne selbst verbraucht zu werden, obwohl sie dabei mancherlei Umwandlungen unterliegen, ehe sie am Ende des Reaktionskreislaufes wieder gebildet werden. ①

Die im Verlaufe der Substratoxydation auf Koenzyme übertragenen Wasserstoffmoleküle werden für andere Stoffwechselprozesse in der Zelle genutzt (■ Reduktion der Karbonsäuren bei der Synthese von Fetten, ↗ S. 86). Das freigesetzte Kohlendioxid wird durch Diffusion aus den Zellen an die Umwelt abgegeben. Dabei spielen bei Tieren vielfach Transportsysteme (■ Blutkreislauf), ähnlich wie bei der Sauerstoffaufnahme, eine Rolle.

Der Vergleich mit der Summenformel der Glukose ($C_6H_{12}O_6$) zeigt, daß bei der Atmung im Verlaufe des Substratabbaus alle sechs Kohlenstoffatome vollständig zu Kohlendioxid oxydiert werden. ②

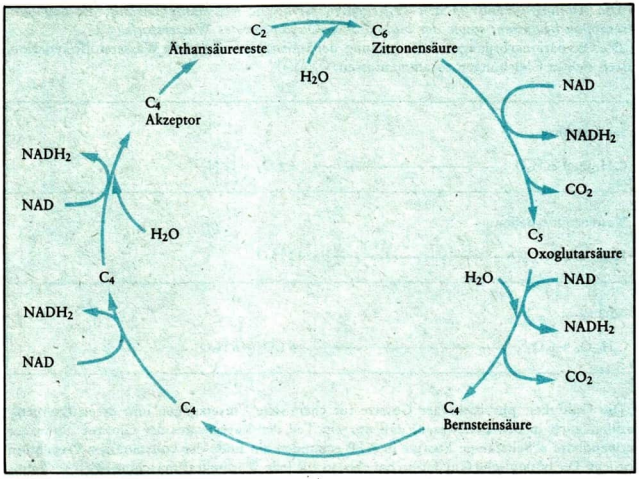
Biologische Wasserstoffoxydation. Die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff läuft gewöhnlich explosionsartig und stark exotherm ab (Knallgasreaktion). Unter biologischen Bedingungen vollzieht sich die Bildung des Wassers bei der Oxydation auf andere Weise. Wasserstoff und Sauerstoff werden stufenweise in ihrer Reduktions-Oxydations-Energie (Redoxpotential) angenähert, bis die Oxydation des Wasserstoffs unter den Bedingungen, die in lebenden Zellen herrschen, vollzogen werden kann. Die bei dieser biologischen Wasserstoffoxydation hintereinander geschalteten Redoxreaktionen ähneln der Elektronentransportkette bei der Photosynthese; sie werden als Atmungskette bezeichnet.

① Stellen Sie anhand der in der Abbildung Seite 71 angegebenen Anzahl der Kohlenstoffatome eine Bilanzierung der beteiligten Moleküle auf!

② Nennen Sie gleichartige Reaktionen bei Substratoxydation und photosynthetischer Kohlendioxidassimilation! Erläutern Sie die Funktion dieser Reaktionen bei Atmung und Photosynthese!

③ An welchen Reaktionen der Atmung ist der Sauerstoff beteiligt?

④ Entwickeln Sie ähnlich den auf Seite 40 dargestellten Redoxreaktionen ein Schema der Atmungskette! Beachten Sie, daß durch Elektronenübertragung in den ersten Schritten Wasserstoff oxydiert wird und in den folgenden Schritten Eisen seinen Oxydationszustand wechselt!



Schematische Darstellung des Säurekreislaufs bei der Atmung

Die ersten Reaktionen dieser Kette bestehen in der Übertragung von Wasserstoff zwischen verschiedenen Koenzymen wasserstoffübertragender Enzyme. Im anschließenden Hauptteil der Atmungskette werden ebenso wie bei den Lichtreaktionen der Photosynthese Elektronen zwischen Koenzymen der entsprechenden Oxydoreduktasen (↗ S. 40) übertragen. Diese Elektronen stammen aus der Oxydation des Wasserstoffs. Neben den Elektronen befinden sich im System der Endoxydation die entsprechenden Wasserstoff-Ionen.

Unmittelbar nach der Oxydation des Wasserstoffs sind die abgegebenen Elektronen energiereich. Im Verlaufe der Redoxreaktionen wird die Energie dieser Elektronen stufenweise vermindert. Auf jenen Stufen, bei denen der frei werdende Energiebetrag genügend groß ist, verbindet sich mit der betreffenden Redoxreaktion die Bildung von ATP.

► *Im Verlaufe der biologischen Wasserstoffoxydation ist mit der schrittweisen Energiefreisetzung die Energiespeicherung in ATP verknüpft.*

Die elektronenübertragenden Oxydoreduktasen sind Eiweiße, an die eine eisenhaltige Nichteiweißverbindung gebunden ist. Diese eisenhaltigen Eiweißmoleküle sind in den Membranen der Mitochondrien (↗ S. 15) lokalisiert. Bei den Elektronenübertragungen wechselt das Eisen reversibel seinen Oxydationszustand. Durch Elektronenaufnahme wird 3-wertiges Eisen (Fe^{3+}) zu 2-wertigem Eisen (Fe^{2+}) reduziert.

Bei der Weitergabe der Elektronen an den nächsten Partner in der Kette der Redoxreaktionen wird das Eisen durch die Elektronenabgabe wieder oxydiert ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$).

Am Ende der Atmungskette werden die Elektronen auf Sauerstoff übertragen; die Sauerstoff-Ionen reagieren dann mit den Wasserstoff-Ionen, die bei der Wasserstoffoxydation gebildet worden waren. Dabei entsteht Wasser. ③④

Die Atmung verläuft in den Teilschritten Glykolyse und Säurekreislauf, die den Substratabbau bewirken, sowie der biologischen Oxydation des Wasserstoffs.

Die Oxydationsvorgänge bei der Atmung, der Substratabbau und die Wasserstoffoxydation, lassen sich in Gleichungen zusammenfassen. ①②③

Substratabbau $C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O \longrightarrow 6\,CO_2 + 12\,H_2$
Wasserstoffoxydation $12\,H_2 + 6\,O_2 \longrightarrow 12\,H_2O$
Atmung $C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O$

Die Gültigkeit physikalischer Gesetze für chemische Umsetzungen und deren Energetik bedingt auch in den Lebewesen, daß nur ein Teil der Energie aus der Glukose als weiter verwendbare arbeitsfähige Energie in ATP gebunden am Ende der vollständigen Oxydation vorliegt. Die biologische Oxydation hat ebenso wie jede Wärmekraftmaschine einen bestimmten energetischen Wirkungsgrad; dieser liegt etwa bei 40 Prozent und ist damit weit höher als bei Wärmekraftmaschinen. Diese Energie wird in den Zellen zur Aufrechterhaltung der Lebensprozesse (■ Biosynthese von Stoffen bei der Assimilation, Transport von Stoffen entgegen dem Konzentrationsgefälle, Bewegungen) genutzt. ④

Die übrigen 60 Prozent werden in Wärmeenergie umgewandelt. Bei gleichwarmen Tieren wird ein Teil dieser Wärmeenergie zur Erhaltung der konstanten Körpertemperatur verwendet.

Bei Pflanzen, die im Vergleich zum Körpervolumen eine sehr große Oberfläche besitzen, wird die Wärme in der Regel an die Umgebung abgestrahlt. In einigen Fällen läßt sich nachweisen, daß auch bei ihnen mit der biologischen Oxydation eine Wärmeentwicklung verbunden ist. ⑤

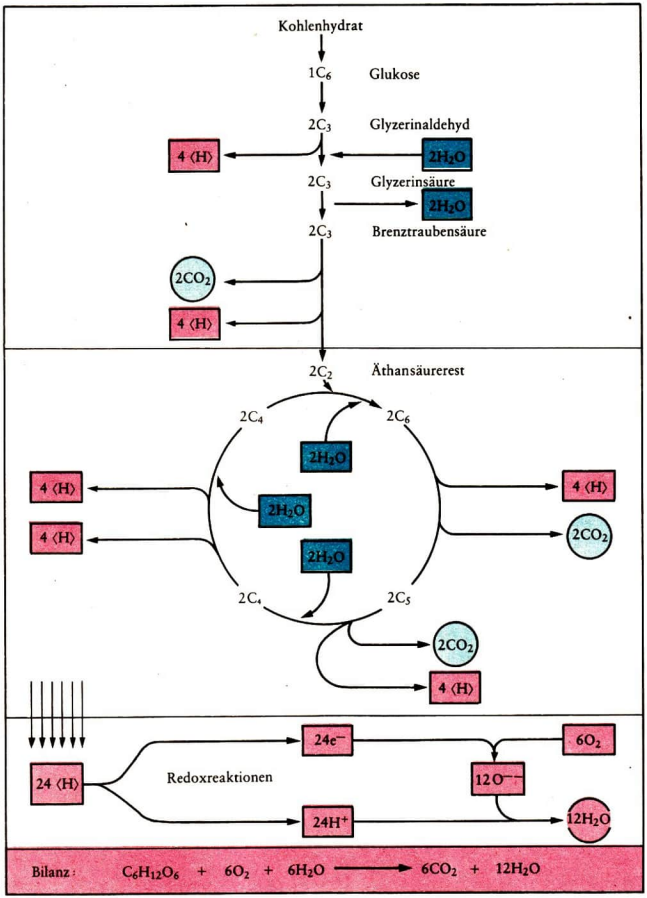
① Stellen Sie die wichtigsten biochemischen Vorgänge bei der Atmung in übersichtlicher Form schriftlich dar! Benutzen Sie dazu die stark vereinfachte Übersicht in der Schemaabbildung auf Seite 73!

② Erläutern Sie den Unterschied zwischen dem oxydativen Substratabbau und der biologischen Oxydation des Wasserstoffs bei der Atmung!

③ In welchen Teilschritten der Atmung erfolgt die Energiefreisetzung? Wie wird die Energie gespeichert?

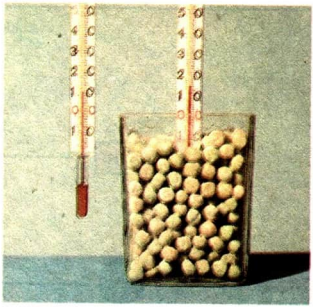
④ Nennen Sie zwei Beispiele für energieaufwendige Stofftransporte im menschlichen Organismus!

⑤ Erklären Sie die Erscheinung, daß Insekten, die sich nachts in sich schließende Blüten verkriechen, Nachtfröste eher überstehen als Insekten, die sich im Freien aufhalten!



Stark vereinfachte Übersicht über die wichtigsten biochemischen Vorgänge bei der Atmung

Blütenstand des Aronstabs mit Hochblatt



Nachweis der Wärmeentwicklung bei keimenden Erbsen

■ Keimende Samen besitzen eine sehr intensive Atmung. In einem wärmeisolierten Gefäß, durch dessen Deckel ein Thermometer ins Innere ragt, läßt sich der Temperaturanstieg bei keimenden Samen infolge ihrer Wärmeentwicklung bei der Atmung verfolgen.

Im Inneren von Blüten, die mehr oder weniger geschlossenen Räumen entsprechen (■ bei Aronstab, bei Kürbis), besteht als Folge der Umwandlung von Atmungsenergie in Wärme eine höhere Temperatur als in der Umgebung der Blüten.

■ Beim Aronstab kann die Temperaturerhöhung im Innern der von dem Hochblatt gebildeten Hülle gegenüber der Außentemperatur bis zu 15 °C betragen, bei Kürbisblüten bis zu 5 °C.

■ Die Selbstentzündung von Heu zeigt, daß bei den biologischen Oxydationsvorgängen in Mikroorganismen ebenfalls ein Teil der Energie als Wärme freigesetzt wird. ①

① Erläutern Sie die Zusammenhänge zwischen folgenden Fakten:
— Die Keimung vieler Kulturpflanzen (■ Garten-Bohne, Gurke) wird durch Temperaturerhöhung günstig beeinflußt.
— In Frühbeeten oder im Freiland werden die Saatbeete mit Stroh oder anderem verrotteten Pflanzenmaterial abgedeckt.

② Erläutern Sie den Begriff „wechselwarme Tiere"! Nennen Sie drei Arten als Beispiele!

③ Begründen Sie, warum alle Atmungsvorgänge durch Temperatur beeinflußbar sind! Ziehen Sie zum Vergleich die Temperaturabhängigkeit der Licht- und der Dunkelreaktion bei der Photosynthese heran!

④ Erklären Sie den Sachverhalt, daß die Baumblüte in Jahren mit hohen Temperaturen sehr viel schneller beendet ist als in kalten Jahren!

Einfluß äußerer Faktoren auf die Atmung

Temperatur. Während bei der Photosynthese nur die Umsetzungen der Dunkelreaktion von der Temperatur beeinflußt werden, sind bei der Atmung alle Reaktionen durch die Temperatur beeinflußbar. Die Atmung wird deshalb stärker von Temperaturschwankungen betroffen als die Photosynthese.

■ Bei Temperaturen unter −10 °C läßt sich bei den meisten Organismen (■ wechselwarme Tiere) keine Atmungsaktivität mehr nachweisen. In einzelnen Fällen ist an überwinternden Pflanzenteilen (■ Blätter von Nadelbäumen) noch bei −20 °C ein Austausch von Atemgasen gemessen worden. ② ③

In Übereinstimmung mit der Van't Hoffschen Regel verdoppelt sich die Atmungsaktivität innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches mit einem Temperaturanstieg um jeweils 10 °C. ④

In der Regel wird aber bei Temperaturanstieg auf Werte über 50 °C die Atmung vermindert. Der Wert der oberen Temperaturgrenze schwankt in Abhängigkeit von der Art der untersuchten Lebewesen und von den herrschenden Umweltbedingungen.

Ebenso wie im Falle der Photosynthese gibt es besonders unter den Mikroorganismen Formen, die an ein Leben bei extremen Temperaturbedingungen außerhalb der Grenzen von −10 °C und +50 °C angepaßt sind und auch bei noch extremeren Temperaturen aktive Atmung zeigen.

Bei Gleichwarmen wird die Atmungsaktivität von den herrschenden Umgebungstemperaturen nur geringfügig oder indirekt beeinflußt. Die Körpertemperatur bestimmt bei ihnen die Atmungsaktivität. Bei sehr tiefen Außentemperaturen wird über ein Regulationssystem die Atmung intensiviert und dadurch der Wärmeverlust an die Außenwelt ausgeglichen.

■ Bei Tieren, die in Winterschlaf oder Winterstarre gefallen sind, sind die Atmungsintensität und auch die Körpertemperatur stark herabgesetzt. Hamster haben während des Winterschlafs eine Körpertemperatur von 5 °C!

Siebenschläfer, ein Winterschläfer ▼

Überwinternde Blattknospen von Spitz-Ahorn und Roßkastanie

Wasser. Wasser beeinflußt die Atmung ähnlich wie die Photosynthese auf verschiedene Weise.

■ Der Öffnungszustand der Spaltöffnungen in den Laubblättern hängt in erster Linie von der Wasserversorgung der Pflanzen ab. Auf diesem Wege beeinflußt die Wasserversorgung die Atmung bei Pflanzen auf indirektem Wege über die mehr oder weniger großen Möglichkeiten zum Austausch der Atemgase.

Die Stoffwechselaktivität des Protoplasmas wird von seinem Wassergehalt beeinflußt. Verringert sich der Wassergehalt des Protoplasmas, so verringert sich mit der allgemeinen Stoffwechselaktivität auch die Atmung. ①②

► *Wassergehalt, Atmungsaktivität und Intensität der Lebensprozesse stehen in engem Zusammenhang.*

Auch der Wassergehalt des Protoplasmas wirkt also als eine indirekte Beeinflussung der Atmung durch den Wasserfaktor.

Sternmoos in trockenem und feuchtem Zustand

Moose an trockenen und feuchten Standorten

Im Verhältnis zu den im Protoplasma enthaltenen und durch die Zellen bewegten Wassermengen ist jene Wassermenge, die an den chemischen Reaktionen der Atmung als Partner direkt beteiligt ist, so gering, daß sich Wassermangel nur unter den extremsten Bedingungen direkt auf die Atmungsreaktionen auswirken kann.

Unter extremen Umweltbedingungen (■ im gelartigen Zellplasma von ruhenden Samen) kann die Atmung bis auf eine Restaktivität herabgesetzt werden, die gerade ausreicht, um den lebenden Zustand zu erhalten, der aber keine darüber hinaus gehenden Aktivitäten gestattet.

Erhaltungsatmung findet in Überdauerungsorganen vieler Pflanzen (■ reife, trockene Samen, Knospen), in den Dauersporen von Bakterien, in Wüstenpflanzen während der Trockenzeit statt. Der Wassergehalt von Samen und Dauersporen beträgt häufig nur etwa 10 % bis 12 %. ③④

Auch bei Tieren, die ungünstige Umweltbedingungen in Kälte- oder Trockenstarre überdauern, ist die Atmung stark herabgesetzt.

■ Bei Bärtierchen, die jahrelange Trockenzeiten überdauern können, ist im Zustand der Trockenstarre die Atmungsintensität auf ein Sechshundertstel gegenüber dem Normalzustand herabgesetzt.

Durch die geringe Atmungsaktivität wird das Überdauern ungünstiger Klimaperioden ermöglicht, ohne daß die Pflanze größere Mengen an Substrat oxydiert und so „verhungert".

Durch den Austausch von Atemgasen stehen die Abläufe der inneren Atmung in einem quantitativ meßbaren Stoffaustausch mit der Umwelt. Zur Ermittlung der Atmungsintensität wird daher in der Regel die Menge des aufgenommenen Sauerstoffs oder die Menge des abgegebenen Kohlendioxids herangezogen. ⑤

■ Reife, trockene Gerstenkörner geben je Kilogramm und Tag 0,3 mg Kohlendioxid ab. Werden die Körner eingequollen und wird damit die Keimung eingeleitet, steigt die Abgabe durch Atmung innerhalb von 24 Stunden auf 2 000 mg Kohlendioxid je Kilogramm und Tag.

Die Sauerstoffaufnahme läßt sich an Manometern ablesen, wenn das Kohlendioxid gleichzeitig aus dem Atemgas entfernt wird. Mit Hilfe der Gaszustandsgleichung kann die gemessene Druckänderung bei konstanter Temperatur und konstantem Volumen in das Volumen des aufgenommenen Sauerstoffs umgerechnet werden.

① Erläutern Sie die Abhängigkeit der Stoffwechselaktivität vom Wassergehalt des Protoplasmas!

② Erläutern Sie den Zusammenhang von Atmung und Stoffwechselaktivität!

③ Beschreiben Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 11 die Bildung von Dauersporen bei Bakterien!

④ Nennen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der biologischen Funktion von Samen und Dauersporen!

⑤ Entwickeln Sie einen einfachen Versuch zum quantitativen Nachweis von Kohlendioxid in der Atemluft! Führen Sie den Versuch als qualitativen Nachweis durch!

Nutzung der Abhängigkeit der Atmung von Außenfaktoren durch den Menschen

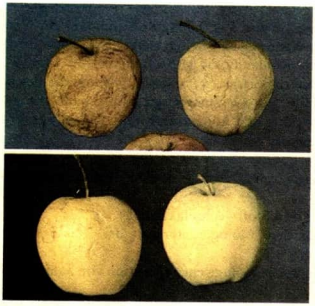
Atmung ist der Abbau körpereigener Stoffe. Atmung ist also stets mit Substanzverlust verbunden. Bei der Atmung wird Energie für andere Stoffwechselprozesse freigesetzt.

Die Abhängigkeit der Atmung von bestimmten Umweltfaktoren (■ Temperatur, Wasser) ist von allgemein biologischer Bedeutung, durch diese Erscheinung können Lebewesen ungünstige Umweltverhältnisse (■ Kälte, Trockenheit) bei herabgesetztem Stoffwechsel ohne wesentlichen Substanzverlust überdauern.

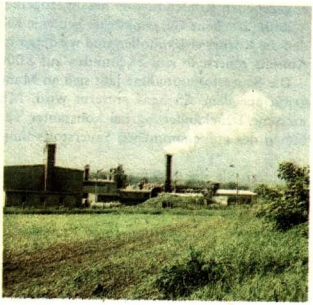
In reifenden Samen wird zur Überdauerung der Samenruhe der Wassergehalt des Protoplasmas herabgesetzt.

Diese Erscheinung kann vom Menschen für wirtschaftliche Zwecke genutzt werden. Obst, Gemüse, Kartoffeln werden bei niedrigen Temperaturen, in trockener Luft und bei erhöhter Kohlendioxidkonzentration gelagert. Alle diese Faktoren tragen zur Herabsetzung der Atmungsprozesse und dadurch zur Verminderung der Substanzverluste bei.

Die Herabsetzung der Atmungsintensität hat außerdem zur Folge, daß energieaufwendige Stoffwechselprozesse in den Pflanzen (■ Wachstum, Entwicklung) nur verlangsamt ablaufen können, so daß das bei der Lagerung unerwünschte Auskeimen (■ bei Kartoffeln, bei Zwiebeln) zeitlich hinausgeschoben wird. Durch die Lagerung von Erntegut bei niedrigen Temperaturen und erhöhter Kohlendioxidkonzentration wird auch die Lebenstätigkeit von Bakterien und Pilzen eingeschränkt, die in der Vorratswirtschaft Schaden anrichten können.



Äpfel nach mehrmonatiger herkömmlicher Lagerung (oben) und Lagerung im Kühlhaus (unten)



Moderne Trockenanlage für Grünfutter

In anderen Fällen ist es nicht möglich, das Erntegut unter solchen Bedingungen zu lagern, die den Atmungsverlust gering halten. Dann muß sich die rasche Verarbeitung oder Konservierung an die Ernte anschließen.

■ Zuckerrüben müssen ohne längere Lagerung in der Zuckerindustrie verarbeitet werden, um die Zuckerverluste durch Atmung so klein wie möglich zu halten.

Der Qualitätsminderung von Gras während der Trocknung zu Heu auf dem Felde wird durch künstliche Trocknung in entsprechenden Trocknungswerken entgegengewirkt.

Gärungen

In den Geweben höherer Pflanzen (■ Wurzelspitzen), in den Muskeln der Tiere, in Bakterien oder in Hefezellen läuft bei Sauerstoffmangel die Dissimilation von organischen Verbindungen nur unvollständig ab, da die Endoxydation stark gehemmt wird oder gar nicht stattfinden kann. In diesen Fällen werden die organischen Verbindungen vergoren und nicht veratmet. Bei normaler Sauerstoffversorgung werden in der Regel die Gärungsprozesse durch eine vollständige Dissimilation ersetzt. Die meisten Mikroorganismen und Zellen höherer Pflanzen und Tiere können bei Sauerstoffmangel ihre Dissimilation fakultativ auf Gärungen umstellen. ①

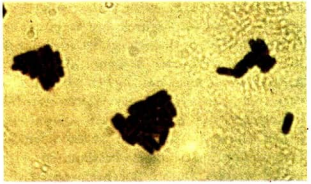
Im Falle der Essigsäuregärung ist allerdings die Anwesenheit von Sauerstoff Voraussetzung für den Ablauf der Gärungsprozesse. Die Essigsäuregärung bildet eine wichtige Ausnahme von der Regel, daß an Gärungen kein Sauerstoff beteiligt ist.

Bei der unvollständigen Dissimilation werden weder alle Kohlenstoffatome zu Kohlendioxid noch aller Wasserstoff des Gärungssubstrats zu Wasser oxydiert. Es entstehen niedermolekulare organische Verbindungen (■ Alkohol, Milchsäure), in denen noch erhebliche Energiemengen gebunden sind. Gärungen werden nach den entstehenden Gärungsprodukten benannt (■ Milchsäuregärung).

Beim Ablauf von Gärungsprozessen wird der Substratabbau nach Ablauf der Glykolyse unterbrochen. Das Endprodukt der Glykolyse, die Brenztraubensäure (2-Oxopropansäure), wird in Alkohol oder Milchsäure umgewandelt. Diese Gärungsprodukte werden von den Mikroorganismen an die Umgebung abgegeben. Die wachsende Konzentration von Gärungsprodukten in der Umgebung führt in vielen Fällen zu Stoffwechselhemmungen, so daß die betreffenden Organismen absterben. In einigen Fällen sind die Gärungsprodukte Gärungssubstrate für eine andere Gruppe von Mikroorganismen.

In den Geweben höherer Lebewesen können die Gärungsprodukte zeitweilig angereichert werden (■ Milchsäure in den Muskeln bei Muskelkater), sie werden später unter Bedingungen ausreichender Sauerstoffversorgung im Stoffwechsel umgesetzt. Erdgeschichtlich bilden die Gärungen die urtümlichere Form der Dissimilation, da mit ihrer Hilfe wahrscheinlich die Lebewesen unter den anfänglichen Bedingungen einer sauerstofffreien Atmosphäre ihren Energiebedarf gedeckt haben. Erst im Verlaufe der späteren Stammesgeschichte der Lebewesen ist mit der Zunahme des Sauerstoffs in der Atmosphäre die Fähigkeit zur vollständigen Dissimilation — verbunden mit der biologischen Wasserstoffoxydation — entstanden. ②

Hefezellen (1000 : 1)



Milchsäurebakterien (1000 : 1)

① Definieren Sie den Begriff Gärung!

② Erläutern Sie die stammesgeschichtlichen Beziehungen zwischen Photosynthese und Atmung!

Alkoholische Gärung

▶ *Alkoholische Gärung ist der Abbau organischer Verbindungen zu Alkohol (Äthanol) und Kohlendioxid.*

Summengleichung

Glukose ⟶ Äthanol + Kohlendioxid

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2$$
$$\Delta H = -234{,}5\ kJ \cdot mol^{-1}$$

Die alkoholische Gärung verläuft in einer Reihe von Teilreaktionen. Sie beginnt, wie auch die Atmung, mit dem enzymatischen Abbau von Stärke zu Glukose, dem eigentlichen Gärungssubstrat. Die Glukose wird durch Kopplung mit Phosphorsäureresten aktiviert und über Zwischenverbindungen (■ Brenztraubensäure) zu Äthanal (Azetaldehyd) umgesetzt.

Mit der Glykolyse ist der oxydative Abbau beendet, das Äthanal wird anschließend zu Äthanol reduziert. Zu dieser Reduktion wird der bei der Oxydation von Glyzerinaldehyd zu Glyzerinsäure im Verlaufe der Glykolyse abgespaltene und an NAD gebundene Wasserstoff verwendet. Neben dem Äthanol ist Kohlendioxid Produkt der alkoholischen Gärung. ①

Energie wird bei der Oxydation von Glyzerinaldehyd zu Glyzerinsäure im Verlaufe der Glykolyse freigesetzt und in ATP gebunden.

Bei der alkoholischen Gärung wird das Substratmolekül (Glukose) in zwei Reaktionsprodukte gespalten (Äthanol und Kohlendioxid), von denen im einen, dem Alkohol, die Kohlenstoffatome in stärker reduziertem Zustand als im Substrat vorliegen, während sie im Kohlendioxid stärker oxydiert sind.

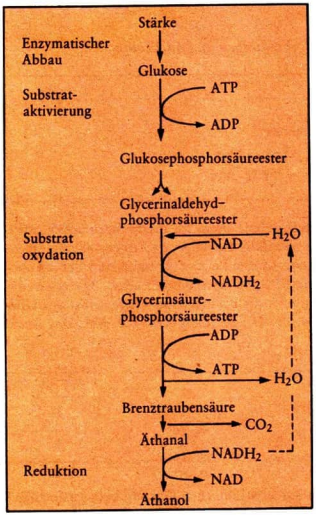
▶ *Die alkoholische Gärung ist ein biologischer Vorgang, der bei der Bäckerei und Alkoholherstellung wirtschaftlich genutzt wird.*

Die Backwarenherstellung beruht zu einem großen Teil auf den Gärungsprozessen von Hefepilzen. Am Beginn des Backprozesses und bereits bei der Teigbereitung werden Stärkemoleküle zu Zucker abgebaut, die dann als Gärungssubstrate für die Backhefe dienen. Während der Alkohol in der Ofenhitze verdampft, treibt das Kohlendioxid den Teig auf, macht ihn locker und porös, bis es zur Verfestigung des Teiges durch die Eiweiße aus dem Getreide kommt und die Backware dadurch ihre Stabilität erhält.

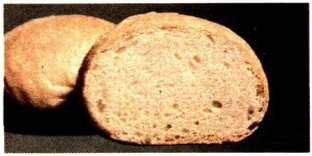
Ebenso wie das Backen gehört auch das Bereiten alkoholischer Getränke zu den geschichtlich bereits seit langer Zeit vom Menschen genutzten biologischen Prozessen. Bei der Weinkellerei werden die natürlichen Hefepilze der Weinbeeren (Weinhefen) als Gärungserreger verwendet; die Zucker der Weinbeeren bilden die Gärungssubstrate. Geschmack und Alkoholgehalt des Weines hängen sowohl von der Weinbeerensorte und ihrem mit den jährlichen Klimaschwankungen wechselnden Zuckergehalt als auch von der Art der jeweiligen Hefestämme ab. Bei einem bestimmten — für jeden Hefestamm unterschiedlichen — Alkoholgehalt werden die Stoffwechselprozesse der Hefe gehemmt, und die Gärung kommt zum Stillstand. Weine haben Alkoholgehalte zwischen 7 und 17 Prozent.

Für die Herstellung von konzentrierteren Spirituosen wird der Alkohol aus Weinen oder anderen Gärungsansätzen herausdestilliert. ②③

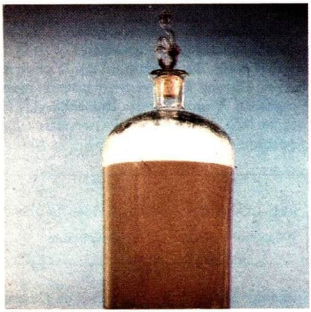
Im menschlichen Körper wird Äthanol rasch vollständig oxydiert (veratmet). Äthanol übt jedoch schädigende Wirkungen auf das Nervensystem aus, wenn es im Übermaß oder ge-



Teilschritte einer unvollständigen Dissimilation



Durch Gärungsprozesse gelockerter Hefeteig



Kohlendioxidbildung bei alkoholischer Gärung

wohnheitsmäßig getrunken wird. Regelmäßiger starker Alkoholgenuß kann Alkoholsucht hervorrufen. Es kommt zu körperlichen Schäden (■ Leberzirrhose) und Zerstörung der Persönlichkeit des Süchtigen. Die Bekämpfung von Alkoholmißbrauch und Alkoholsucht ist eine wichtige, aber auch schwierige soziale Aufgabe.

Der Einfluß des Alkohols auf das Nervensystem macht sich schon nach dem Genuß kleiner Mengen bemerkbar. Konzentrationsvermögen und Reaktionsfähigkeit sind herabgesetzt; deshalb sind das Führen von Fahrzeugen und die Ausübung der Berufstätigkeit unter Einfluß von Alkohol gesetzlich verboten. Auch betrunkene Fußgänger stellen eine Gefahr für den Straßenverkehr dar.

Im Extremfall kann übermäßiger Alkoholgenuß zum Tode führen.

1. Wenden Sie die Definition des Begriffs Gärung auf den konkreten Fall alkoholischer Gärung an!
2. Erläutern Sie, warum hochprozentige Spirituosen nicht durch Gärungsprozesse hergestellt werden können!
3. Weisen Sie experimentell den Einfluß von Substratkonzentration (■ 1 %ige und 10 %ige Zuckerlösung) und Temperatur (■ 18 °C und 35 °C) auf den Ablauf der alkoholischen Gärung nach! Nehmen Sie als Maß für die Intensität der Gärung die Anzahl der Kohlendioxidbläschen je Zeiteinheit! Protokollieren Sie den Verlauf des Experiments mit Angabe der Arbeitsmaterialien und der Ergebnisse!

Milchsäuregärung

► *Milchsäuregärung ist der Abbau organischer Verbindungen zu Milchsäure.*

Summengleichung:

Glukose ⟶ 2 Milchsäure

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ CH_3CHOHCOOH$

$\Delta H = -197\ kJ \cdot mol^{-1}$

Die Erreger der Milchsäuregärung sind Milchsäurebakterien. Im dissimilatorischen Stoffwechsel dieser Bakterien werden Kohlenhydrate ebenfalls zunächst zu Zucker abgebaut. Sie werden durch die Reaktionen der Glykolyse genau so wie bei der Atmung und der alkoholischen Gärung in Brenztraubensäure umgewandelt. Da den betreffenden Bakterien das Enzym zur Abspaltung des Kohlendioxids fehlt, wird die Brenztraubensäure selbst mit Hilfe des an NAD gebundenen Wasserstoffs reduziert, der bei der Glykolyse entsteht. Das Reaktionsprodukt ist Milchsäure. ①

$$\underset{\text{Brenztraubensäure}}{CH_3\text{–}CO\text{–}COOH} \xrightarrow{NADH_2} \underset{\text{Milchsäure}}{CH_3\text{–}CHOH\text{-}COOH}$$

Bei der Milchsäuregärung wird im Gegensatz zur alkoholischen Gärung kein gasförmiges Reaktionsprodukt (Kohlendioxid) gebildet.

Ebenso wie die alkoholische Gärung setzt die Milchsäuregärung Sauerstoffabschluß voraus.

Milchsäure hemmt in bestimmten Konzentrationen die Stoffwechselprozesse vieler Mikroorganismen. Sie wird deshalb als Konservierungsmittel genutzt.

► *Die Milchsäuregärung ist ein biologischer Vorgang, der wirtschaftlich für Konservierungsverfahren genutzt wird.*

Die Milchsäuregärung hat seit langem weitreichende wirtschaftliche Bedeutung für die Verarbeitung und Konservierung von Lebensmitteln, für die Bereitung von Sauerteig in der Bäckerei sowie für die Bereitung von Silofutter für Nutztiere. Bei der Bereitung von Silofutter ebenso wie bei der Herstellung von Sauerkraut oder sauren Gurken wird durch dichte Packung (Festwalzen des Silagegutes, Feststampfen des Sauerkrautes) und Überschichten mit Salzlösung der notwendige Sauerstoffabschluß bewirkt. Die gebildete Milchsäure wirkt schädigend oder tödlich auf viele Mikroorganismen und schützt auf diese Weise die vergorenen Nahrungs- oder Futtermittel vor Fäulnis und macht sie haltbar. ②

Die Milchsäurebakterien vergären den Milchzucker der Milch. Sie sind gemeinsam mit bestimmten Pilzen wichtige Reduzenten bei der Käsebereitung.

① Vergleichen Sie Atmung und Gärung miteinander! Stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Stoff- und Energieumsetzungen tabellarisch dar!

② Belegen Sie an einem Beispiel die Abhängigkeit der Milchsäuregärung von Außenfaktoren (■ Temperatur)!

Anreicherung von Milchsäure bei Sauerstoffmangel in den Muskeln bildet vermutlich die Ursache für den Muskelkater.

Ein weiterer wirtschaftlich genutzter Gärungsprozeß ist die Essigsäuregärung, sie bewirkt die Oxydation von Äthanol zu Essigsäure. Essigsäuregärung ist eine oxydative Gärung, die nur unter Beteiligung von Sauerstoff abläuft.

Bei der Essigsäuregärung ist das Gärungsprodukt bestimmter Hefen, der Alkohol, das Gärungssubstrat der Essigsäurebakterien.

■ Essigsäurebakterien oxydieren Äthanol weiter zu Essigsäure (Weinessig). Wird bei der Weinbereitung nicht auf guten Sauerstoffabschluß geachtet, so kommt es spontan zur Essigsäuregärung. Das häufig bei der Weinbereitung im Haushalt verwendete Gärröhrchen dient dem Ausschluß von Sauerstoff, indem es zwar den Austritt des CO_2 gestattet, das bei der alkoholischen Gärung entsteht, aber den Sauerstoffzutritt verhindert.

▶ Dissimilation ist der vollständige oder unvollständige Abbau von Assimilaten unter Freisetzung von Energie.

Die Atmung ist eine vollständige Dissimilation, sie umfaßt Substratabbau (Glykolyse und Säurekreislauf) und biologische Oxydation des Wasserstoffs.

Beim Substratabbau werden die Assimilate in Kohlendioxid und Wasserstoff umgewandelt, der an Koenzyme gebunden wird. Bei der Wasserstoffoxydation wird die Reduktionsenergie des Wasserstoffs schrittweise verringert, bis die Oxydation des Wasserstoffs durch den Luftsauerstoff erfolgen kann. Dabei entsteht Wasser. Dieser Prozeß geschieht in einer Folge von Redoxreaktionen, von denen einige mit der Bildung von ATP verknüpft sind; er ist die Hauptquelle an arbeitsfähiger Energie für die Zellen.

Die innerzellulären Vorgänge der Atmung bilden zusammen die innere oder Zellatmung. Sie ist mit einem Gasaustausch und -transport, der äußeren Atmung, verbunden.

Die Gärung ist eine unvollständige Dissimilation, sie umfaßt nur den teilweisen Substratabbau. Die Substrate werden nicht vollständig zu Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut; Gärprodukte sind niedermolekulare organische Verbindungen mit relativ hohem Energiegehalt.

Bei einigen Gärungen wird ebenfalls Kohlendioxid gebildet, andere verlaufen ohne Gasausscheidung, und nur bei der Essigsäuregärung wird Sauerstoff aufgenommen.

Atmung und Gärungen sind von Umweltfaktoren (■ Temperatur, Wasser, Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt der Luft) abhängig. Diese Abhängigkeit wird wirtschaftlich genutzt, um Erntegut weitgehend vor Substanzverlusten und vor Verderb durch Schädlinge zu schützen.

Gärungen und Gärungsprodukte haben große wirtschaftliche Bedeutung für den Menschen (■ Backwarenherstellung, Alkoholproduktion, Konservierung).

Zusammenwirken der Stoffwechselvorgänge

Reis, Sojabohne, Sonnenblume: Pflanzen, deren Assimilate teilweise in die vom Menschen genutzten Speicherstoffe Stärke, Eiweiße und Fette umgewandelt werden

Assimilation als energiebindender, stoffaufbauender Prozeß und Dissimilation als energiefreisetzender, stoffabbauender Prozeß hängen eng miteinander zusammen, da die Assimilationsprodukte zugleich die Substrate der Dissimilation bilden; und in vielen Teilschritten der entsprechenden Reaktionen ist die Gegenläufigkeit der Prozesse und das Auftreten gleicher Zwischenstufen augenfällig. ①②

Eine wesentliche Abweichung von diesen gegenläufigen Stoffumwandlungen in assimilatorischen und dissimilatorischen Prozessen bilden die am Chlorophyll ablaufenden Reaktionen der Energieabsorption und -wandlung während der Lichtreaktion der Photosynthese.

▶ *Die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie als energetische Grundlage für alle Lebensprozesse geschieht nur während der Photosynthese.*

Die in der Lichtreaktion gebildete chemische Energie wird durch Bildung von ATP gebunden. ③

Dieses ATP ist der Energiespender für die Kohlendioxidreduktion und die Aktivierung der Zucker bei der Kohlenstoffassimilation in den Chloroplasten, die zur Bildung hochmolekularer, energiereicher Assimilate führen.

Ein Teil dieser Energie wird bei der Dissimilation wieder verfügbar, indem er in der Atmungskette die Bildung von ATP ermöglicht. Dieses ATP kann für weitere Stoffwechselvorgänge (■ Eiweiß- und Fettsynthese) außerhalb der Chloroplasten genutzt werden. Es deckt darüber hinaus den Energiebedarf von Transportprozessen und bei der Leistung von mechanischer Arbeit.

In den Zellen grüner Pflanzen laufen die Stoffwechselprozesse der Photosynthese und der Atmung nebeneinander ab. Zwischen den einzelnen Räumen innerhalb der Zellen werden bereits niedermolekulare Assimilate (■ phosphorylierte Glyzerinsäure, Aminosäuren) ausgetauscht, ohne daß erst hochmolekulare Assimilate entstehen müssen. ④

Nicht nur bestimmte Verbindungen (■ Glukose, Glyzerinaldehyd) treten als gleiche Zwischenstufen sowohl bei der Photosynthese wie auch bei der Atmung auf, auch gleiche Enzyme können an beiden Prozessen mitwirken.

■ Das Koenzym NADP ist an Prozessen der Licht- und Dunkelreaktion in der Photosynthese beteiligt; es wirkt auch mit bei einigen Oxydationsvorgängen der Atmung. ⑤⑥

■ Phosphortransferasen sind an der Aktivierung der Zucker durch Phosphorylierung bei auf- und abbauenden Stoffwechselvorgängen beteiligt. ⑦

Bei der Atmung freigesetztes Kohlendioxid kann bereits in den Zellen grüner Pflanzen wieder als Ausgangsstoff für die Photosynthese genutzt werden.

Die bei der Assimilation gebildeten Verbindungen (■ Traubenzucker) müssen als Substrate für Dissimilationsvorgänge vom Ort ihrer Bildung zu teilweise entfernten Orten ihrer Verwendung gelangen. In den Pflanzen ist Saccharose die hauptsächlichste Ferntransportform stickstofffreier Verbindungen; stickstoffhaltige Verbindungen werden in Form von bestimmten Aminosäuren transportiert. ⑧

Durch die Leitbündel gelangen diese Transportverbindungen in alle Teile der Pflanzen, wo sie in den Zellen wieder in solche Zucker oder Aminosäuren umgewandelt werden, von denen entweder die Synthese hochmolekularer Assimilate oder die vollständige beziehungsweise teilweise Dissimilation ausgeht. Pflanzliche Zellen und Gewebe, die mit Assimilaten in Form von niedermolekularen organischen Verbindungen durch den Transportstrom versorgt werden, betreiben heterotrophe Assimilation, wie sie bei tierischen Lebewesen ausschließlich stattfindet.

▶ *Autotrophe und heterotrophe Assimilation unterscheiden sich nicht in der Synthese hochmolekularer Assimilate aus niedermolekularen organischen Verbindungen, sondern nur in der Herkunft dieser Ausgangsstoffe.*

Auch in den Zellen der heterotrophen Tiere und Mikroorganismen vollziehen sich Assimilation und Dissimilation gleichzeitig und nebeneinander. Assimilation und Dissimilation sind dabei auf die gleiche Weise über die Produkt-Substrat-Beziehung miteinander verknüpft wie Photosynthese und Atmung in autotrophen Zellen und Organismen. Der Ferntransport von niedermolekularen Verbindungen (■ Glukose, Aminosäuren) erfolgt in Flüssigkeitsströmen des Blutkreislaufsystems und der Lymphgefäße.

Assimilation und Dissimilation sind Stoffwechselvorgänge, die bei allen Organismen relativ gleichartig verlaufen. Sie laufen gleichzeitig und nebeneinander in den Zellen ab, wobei bei Wachstumsvorgängen assimilatorische, bei Alterungsprozessen dissimilatorische Reaktionen überwiegen. ⑨

① Nennen Sie Beispiele, in denen die Umkehrung der Reaktionen bei Assimilations- und Dissimilationsvorgängen deutlich wird!

② Nennen Sie Ausgangsstoffe und Endprodukte von Photosynthese und Atmung! Stellen Sie Beziehungen her!

③ Beschreiben Sie ausführlich den Vorgang der Energieübertragung von der Lichtstrahlung auf ATP!

④ Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion am Beispiel der räumlichen Verteilung von Stoffwechselvorgängen innerhalb der Zelle!

⑤ Erläutern Sie die Verknüpfung von Licht- und Dunkelreaktion bei der Photosynthese durch wasserstoffübertragende Enzyme!

⑥ Beschreiben Sie die Bedeutung von wasserstoffübertragenden Enzymen bei der Atmung! Setzen Sie sie zu der Bedeutung der wasserstoffübertragenden Enzyme bei der Photosynthese in Beziehung!

⑦ Beschreiben Sie die Funktion der Atmungskette! Welchen Vorgängen bei der Photosynthese entspricht sie?

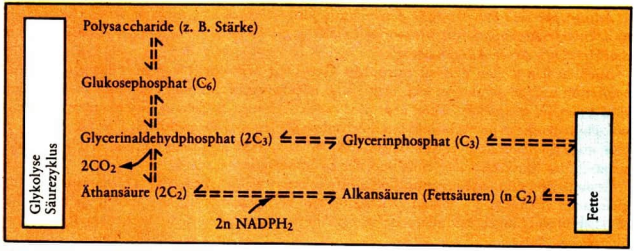
⑧ Nennen Sie Reaktionen, die Voraussetzung für den Transport und die Speicherung von Assimilaten sind! Welche Gruppen von Enzymen können beteiligt sein?

⑨ Erläutern Sie Photosynthese und Atmung als Einheit von widersprüchlichen Seiten der Stoffwechselvorgänge!

Biosynthese und Abbau von Fetten und Eiweißen

Fette sind stickstofffreie Verbindungen, die aus Glyzerin und Monokarbonsäuren mit zwölf bis achtzehn Kohlenstoffatomen bestehen. Die Synthese dieser Bestandteile geht von Stoffen, die im Verlaufe der Atmung gebildet werden, aus. Das Glyzerin entsteht aus einem Zwischenprodukt der Glykolyse, während an der Bildung der Karbonsäuremoleküle die Äthansäurereste beteiligt sind, die beim Übergang von der Glykolyse zum Säurekreislauf aus der Brenztraubensäure entstehen.

Die Verknüpfung von Glyzerin und Monokarbonsäuren zu Fetten ist ein endothermer Vorgang, für dessen Ablauf Energie aus ATP freigesetzt werden muß. Da die Karbonsäuren durch Aneinanderfügen von Äthansäureresten und deren Reduktion entstehen, die Äthansäurereste aber jeweils zwei Kohlenstoffatome besitzen, findet man unter den Karbonsäuren der natürlich vorkommenden Fette (Fettsäuren) vorwiegend solche mit gradzahligen Ketten von Kohlenstoffatomen.



Biosynthese und Abbau von Fetten

Der Abbau der Fette bei der Dissimilation beginnt mit der enzymatisch katalysierten Hydrolyse der Fette in die eigentlichen Atmungssubstrate Glyzerin und Fettsäuren.

Glyzerin kann in den Reaktionsfolgen der Substratoxydation — Glykolyse mit anschließendem Säurekreislauf — und der anschließenden biologischen Oxydation des Wasserstoffs restlos abgebaut werden. Es kann aber auch über die Bildung von Glyzerinaldehyd in einer Folge von Umsetzungen in Kohlenhydrate verwandelt werden und damit praktisch eine Umkehrung der entsprechenden Schritte in der Glykolyse durchlaufen. Vergleichbare Reaktionen finden in Chloroplasten ebenfalls bei der Bildung von Zuckern im Anschluß an die Reduktion des Kohlendioxids statt.

Die Fettsäuren werden durch Reaktionen, die eine Umkehrung des Syntheseprozesses darstellen, in aktivierte Äthansäurereste zerlegt und dabei bereits teilweise oxydiert. Die Äthansäurereste können im Säurekreislauf vollständig oxydiert, das heißt dissimiliert werden. Aus ihnen können jedoch in Umkehrung der Glykolyse auch Kohlenhydrate synthetisiert werden.

► *Fette lassen sich in vielen Zellen verhältnismäßig leicht in Kohlenhydrate und umgekehrt Kohlenhydrate in Fette umwandeln.*

Die Brücke zwischen den beiden Stoffgruppen bilden die Reaktionen und Verbindungen aus der Substratoxydation.

Für die *Eiweißsynthese* werden stickstoff**haltige** Aminogruppen benötigt, von denen sich der Name Aminosäuren für die Bausteine der Eiweiße ableitet.

Tiere können von den für die Eiweißsynthese erforderlichen 20 Aminosäuren nur etwa die Hälfte selbst bilden, die übrigen acht bis zehn Aminosäuren müssen sie mit der Nahrung aufnehmen. Zur Biosynthese dieser essentiellen (wesentlichen) Aminosäuren sind ausschließlich die autotrophen Pflanzen befähigt.

Der Züchtung und dem Anbau von eiweißhaltigen Kulturpflanzen für die menschliche Ernährung und als wertvolle Futtergrundlage für die Nutzviehhaltung kommt in den landwirtschaftlichen Produktionsbetrieben große Bedeutung zu.

Eiweiß- und fettliefernde Kulturpflanzen		
Pflanzenname	**Anteil der Nährstoffe in % genutzter Trockensubstanz**	
	Eiweiße	**Fette**
Sojabohne	24 bis 50	13 bis 27
Erdnuß	23 bis 37	38 bis 55
Raps	20 bis 30	42
Sonnenblume	20 bis 30	38
Erbse	20 bis 31	0 bis 2
Garten-Bohne	16 bis 32	1 bis 3
Ackerbohne	24 bis 34	1 bis 2
Lupine	27 bis 48	10 bis 15
Luzerne	21 bis 23	keine Angaben

In Pflanzenzellen wird die Aminogruppe aus aufgenommenen Ammoniumsalzen oder durch Reduktion von Nitrat gebildet. Dabei entsteht zunächst Ammoniak (NH_3).

Die Nitratreduktion erfolgt ähnlich wie die Reduktion des Kohlendioxids durch an Koenzyme gebundenen Wasserstoff. Die reduzierten Koenzyme (■ $NADPH_2$) können aus der Photosynthese oder aus der Atmung stammen.

Eine Reihe von Bakterien kann Luftstickstoff (N_2) zu Aminogruppen reduzieren. In Symbiose mit den Wurzeln von Schmetterlingsblütengewächsen lebende Knöllchenbakterien versorgen auf diese Weise ihre Symbiosepartner mit Stickstoffverbindungen für die Synthese von Aminosäuren. Frei lebende stickstoffbindende Bakterien sind eine wichtige Stickstoffquelle für den Boden. ①

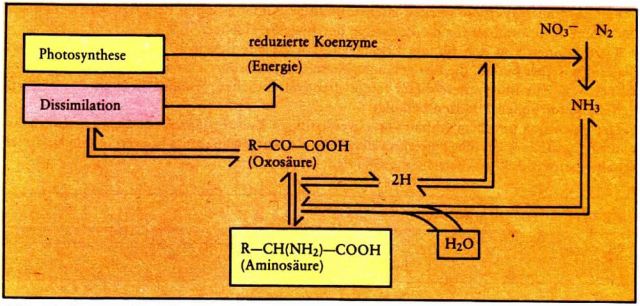
Das bei der Nitratreduktion gebildete Ammoniak verbindet sich mit Karbonsäuren, die dabei gleichzeitig reduziert werden. Es entstehen Wasser und Aminosäuren, in denen der Stickstoff als Aminogruppe vorliegt.

Die wichtigsten dieser als Bausteine für die Aminosäuren dienenden organischen Säuren kommen als Zwischenprodukte der Gykolyse und des Säurekreislaufs vor. Diese Reaktionsfolgen der Dissimilation bilden deshalb den Ausgangspunkt für die Synthese der wichtigsten Aminosäuren.

Die Synthese von Aminosäuren aus Ammoniak und Oxosäuren ist ebenfalls ein endothermer Prozeß, dessen Energiebedarf aus der Dissimilation gedeckt wird.

① Erläutern Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klassen 9 und 11 die Bedeutung stickstoffbindender Bakterien für die Land- und Forstwirtschaft!

② Begründen Sie die Bedeutung vieler Schmetterlingsblütengewächse (■ Luzerne, Wicke, Klee) als wertvolle Futterpflanzen!



Schematische Darstellung der Aminosäuresynthese

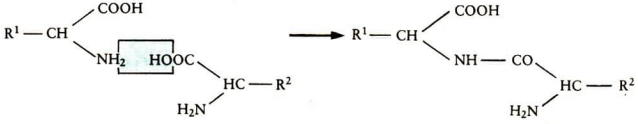
2-Oxoglutarsäure — Glutaminsäure

$$\begin{array}{l} COOH \\ | \\ C{=}O \\ | \\ CH_2 + NH_3 + NADH_2 \\ | \\ CH_2 \\ | \\ COOH \end{array} \rightleftharpoons \begin{array}{l} COOH \\ | \\ CH(NH_2) \\ | \\ CH_2 + H_2O + NAD \\ | \\ CH_2 \\ | \\ COOH \end{array}$$

Die Aminosäuren werden durch ATP für die Eiweißsynthese aktiviert. Anschließend können in den Zellen unter Wasserabspaltung beliebig viele Aminosäuremoleküle zu Peptiden und schließlich zu Eiweißen verknüpft werden.

Die Eiweißsynthese wird durch die genetische Information gesteuert.

In Abhängigkeit von der Anzahl der beteiligten Aminosäurebausteine eines Peptids entstehen Dipeptide (2 Aminosäurereste), Tripeptide (3 Aminosäurereste) und so weiter, bis hin zu Polypeptiden, den eigentlichen Eiweißmolekülen, die mindestens 100, oft aber wesentlich mehr Aminosäurebausteine enthalten.



Die Knüpfung der Peptidbindungen zwischen den Aminosäureresten eines Eiweißmoleküls ist ebenfalls ein endothermer Vorgang, für den ATP aus Photosynthese oder Atmung bereitgestellt werden muß.

▶ *Die Synthese von Eiweiß als Assimilat ist ein stark energiebindender Prozeß.* ①②

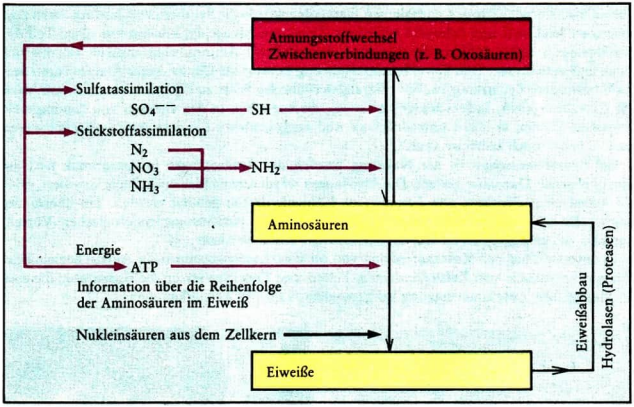
Für die Bildung gleicher Mengen Kohlenhydrate und Eiweiße wird bei der Eiweißsynthese eine größere Energiemenge als bei der Kohlenhydratbildung gebunden. Umgekehrt kann mit der gleichen Energiemenge mehr Kohlenhydrat als Eiweiß gebildet werden. ③

Bei heterotropher Assimilation nehmen die Zellen, Gewebe oder Lebewesen in der Regel Aminosäuren auf. Die sehr stark energieaufwendige Reduktion von Kohlendioxid und Nitrat beziehungsweise von Luftstickstoff entfällt.

Beim Abbau der Eiweiße werden die Peptidbindungen durch eiweißspaltende, hydrolytisch wirkende Enzyme, die Proteasen (■ Trypsin), gespalten. ④

Die bei der Hydrolyse entstehenden freien Aminosäuren werden in Oxosäuren und Ammoniak zerlegt. Die Oxosäuren können in den Säurekreislauf eingeführt und durch Dissimilation vollständig abgebaut werden. Das freie Ammoniak ist ein Zellgift. Aminosäuren werden bei Tieren entweder sofort wieder zur Bildung neuer Aminosäuren verwendet oder durch Urinbildung als Harnstoff aus dem Körper entfernt.

Pflanzen binden den Stickstoff des Ammoniaks durch Einbau als Aminogruppe in andere Aminosäuren. Auf diese Art können sie die im Ammoniak bei seiner Bildung durch Reduktion von Nitraten gebundene Energie für ihren Stoffwechsel erneut nutzen. ⑤



Biosynthese und Abbau von Eiweißen

① Nennen Sie endotherme Reaktionen, die bei der Eiweißsynthese autotropher und heterotropher Organismen ablaufen! (Berücksichtigen Sie dabei die Herkunft der Oxosäuren!) Erläutern Sie, aus welcher Quelle jeweils der Energiebedarf gedeckt wird!

② Beschreiben Sie, vom Nitrat-Ion ausgehend, die Biosynthese der Eiweiße!

③ Begründen Sie den relativ hohen Eiweißgehalt (↗ S. 46) in den Samen von Schmetterlingsblütengewächsen! Werten Sie Hülsenfrüchte und Getreide in ihrer Bedeutung für eine vollwertige Ernährung!

④ Skizzieren Sie entsprechend der Abbildung auf Seite 88 die Hydrolyse eines Tripeptids!

⑤ Ordnen Sie die einzelnen Reaktionen des Eiweißabbaus den Schrittfolgen der vollständigen Dissimilation zu! Erläutern Sie jeweils die relative Höhe der Energiefreisetzung!

Bedeutung der Stoffwechselzusammenhänge für die menschliche Ernährung

Die relativ leichte Umwandlung von Fetten in Kohlenhydrate und umgekehrt spielt in der Ernährungsphysiologie der Tiere und des Menschen eine große Rolle.

Werden von erwachsenen Menschen oder ausgewachsenen Haustieren mehr Kohlenhydrate mit der Nahrung aufgenommen als der Bedarf des Körpers erfordert, dann werden die Kohlenhydrate in Fette verwandelt. Die Fette werden im Unterhautfettgewebe abgelagert, was rasch zur Übergewichtigkeit führen kann.

Übergewichtigkeit belastet den Kreislauf in starkem Maße. In der Folge nimmt die Leistungsfähigkeit des Organismus ab, die Anfälligkeit gegen Krankheiten steigt dagegen, und in extremen Fällen kommt es zum Herzinfarkt. ①

Die Umwandlung von Fetten oder Kohlenhydraten in Eiweiße, die für Bau und Funktion der Zellen von grundlegender Bedeutung sind, ist dagegen kaum möglich. Zusätzlich zu den in Fetten und Kohlenhydraten enthaltenen Elementen würde die Synthese von Aminosäuren und Eiweißen Stickstoff und Schwefel erfordern. Tiere und Menschen können nur einen Teil der Aminosäuren selbst bilden, die übrigen „essentiellen" Aminosäuren müssen sie mit der Nahrung aufnehmen. Den Eiweißen der Nahrung kommt als Quelle dieser Aminosäuren deshalb besondere Bedeutung zu. Eiweißmangelernährung führt zu typischen Krankheitsbildern (■ Gewichtsverlust, Leberschäden, Anämie), die vor allem in den ehemals von den imperialistischen Staaten kolonial unterdrückten und ausgebeuteten Ländern weit verbreitet waren und es heute noch teilweise sind. ②③

Bei Eiweißüberschuß in der Nahrung werden die Aminosäuren in Ammoniak und die entsprechende Oxosäure zerlegt. Die Oxosäuren werden entweder vollständig oxydiert, oder sie können zur Synthese von Fetten oder Kohlenhydraten genutzt werden. Ein übermäßig großer Eiweißanteil in der Nahrung hat also keinen ernährungsphysiologischen Vorteil, sondern die gleichen Folgen wie zuviel Fett oder Kohlenhydrate. ④

Kenntnisse über den Zusammenhang von Stoffwechselprozessen beim Abbau beziehungsweise der Synthese von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen lassen die Bedeutung, die eine in Menge und Zusammensetzung ausgewogene Nahrung hat, erkennen.

Fruchtstand von Hirse

Blütenstände der Ackerbohne

In Abhängigkeit von körperlicher und geistiger Belastung des Menschen sowie von Alter und Entwicklungszustand kann der Bedarf an Nährstoffen und Vitaminen allerdings variieren (■ erhöhter Eiweißbedarf in Wachstumsphasen). ⑤

Vitaminbedarf des Menschen in Abhängigkeit von Belastung und Alter

Personengruppe	Vitamin (in mg) A	B_{12}	B_2	C
Männer				
bei leichter Arbeit	0,9	1,4	1,4	70
bei mittlerer Arbeit	0,9	1,6	1,6	70
bei schwerer Arbeit	0,9	2,0	2,0	70
Frauen				
bei leichter Arbeit	0,9	1,3	1,3	70
bei mittlerer Arbeit	0,9	1,5	1,5	70
bei schwerer Arbeit	0,9	1,8	1,8	70
Schwangere	1,1	1,8	1,9	100
Stillende	1,1	2,0	2,0	100
Kinder und Jugendliche				
1 bis 3 Jahre	0,4	0,7	0,7	40
10 bis 12 Jahre	0,8	1,5	1,5	70
16 bis 18 Jahre	0,9	1,5 bis 1,9	1,5 bis 1,9	70

Der Anteil an Kohlenhydraten in der menschlichen Nahrung wird fast ausschließlich durch Kulturpflanzen gedeckt, während der Anteil an Fetten und Eiweißen wenigstens teilweise über tierische Produkte gedeckt wird. Ein Teil der für den Menschen essentiellen Aminosäuren ist nur in tierischen Eiweißen in genügender Menge enthalten.

Kohlenhydratliefernde Kulturpflanzen

Pflanzenname	Anteil der Nährstoffe in % genutzter Trockensubstanz Kohlenhydrate	Proteine	Fette
Weizen	70	12	2
Mais	72	10	4
Reis	78	7	2
Hirse	60	11	5
Hafer	60	11	6
Kartoffeln	17 bis 18	2	0,1

① Erläutern Sie anhand der Abbildung auf Seite 86 die Möglichkeiten der wechselseitigen Umwandlung von Kohlenhydraten und Fetten!

② Nennen Sie eiweißhaltige tierische und pflanzliche Nahrungsmittel, die in Ihrer täglichen Kost enthalten sind!

③ Werten Sie das in Ihrer täglichen Kost enthaltene Verhältnis von Kohlenhydraten, Eiweißen und Fetten!

④ Leiten Sie aus Ihren Kenntnissen über die Verbindung zwischen den Stoffwechselvorgängen Regeln für eine ernährungsphysiologisch günstige Nahrung ab!

⑤ Begründen Sie, warum in der menschlichen Nahrung Vitamine enthalten sein müssen!

Richtige Ernährung nach Menge und Zusammensetzung der Nahrung ist ein bedeutender Faktor sowohl für das persönliche Wohlergehen als auch für die Belange der Volkswirtschaft. In allen industriell und wirtschaftlich hoch entwickelten Ländern stellt die Überernährung vieler Menschen sowie der steigende Nahrungskonsum ein ernstes wirtschaftliches Problem dar, während in den unterentwickelten Ländern vielfach viele Millionen Menschen jährlich an Unterernährung sterben. Im Zusammenhang damit erhalten die Erscheinungen der Überernährung ein zusätzliches soziales Gewicht.

In den Zellen können gleichzeitig Assimilation und Dissimilation ablaufen. Sie sind an unterschiedliche Zellbestandteile gebunden.

Bei der Dissimilation herrschen Abbau- und Oxydationsvorgänge vor, die gleichzeitig zu Ausgangsstoffen und Energiebereitstellung für die Synthesen führen. Syntheseprozesse sind für Assimilationsvorgänge charakteristisch.

Assimilation und Dissimilation sind durch Stoffumwandlungen und Energieübertragung miteinander verknüpft.

Glykolyse und Säurekreislauf bilden das Zentrum der Stoffumwandlungen in den Zellen.

Äthansäurereste und Glyzerin aus den Reaktionsfolgen von Glykolyse und Säurekreislauf bilden die Ausgangsstoffe für die Synthese von Fetten.

Oxosäuren des Säurekreislaufs dienen als Akzeptoren für Aminogruppen bei der Synthese von Aminosäuren, aus denen Eiweiße synthetisiert werden.

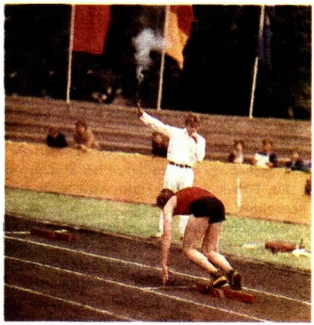
Biosynthesen von Eiweißen, Fetten und Kohlenhydraten sind endotherme Prozesse, für die die Energie aus ATP genutzt wird. ATP kann in allen Zellen gebildet werden. Die Energie des ATP dient zur Aktivierung der Bausteine hochmolekularer Verbindungen.

ATP-Bildung bei der Atmung und ATP-Verbrauch in Synthesen bedingen sich durch das Verbindungspaar ATP/ADP gegenseitig. Energiebindung in Synthesen und Energiefreisetzung bei der Atmung sind nach dem Prinzip eines Regelkreises über das Verbindungspaar ATP/ADP miteinander verknüpft.

Assimilation und Dissimilation beziehungsweise Synthesen und Abbau sind einander gegenseitig bedingende biologische Vorgänge.

Reiz- und Bewegungsphysiologie

Vom Lichteinfall beeinflußte Blattstellung der Kompaßpflanze



Sprinter in Erwartung des Startschusses, auf den in Sekundenbruchteilen reagiert werden muß

Alle Lebewesen stehen mit ihrer Umwelt durch Stoff- und Energieaustausch in engen Wechselbeziehungen. Die physikalischen und chemischen Größen, welche die Umwelt bestimmen, unterliegen ständig mehr oder weniger deutlichen Änderungen (■ Wechsel der Helligkeit, Änderungen der Feuchtigkeit oder des Salzgehaltes, Temperaturschwankungen, wechselnde Konzentrationen von Duftstoffen).

Alle Lebewesen sind befähigt, diese Umweltgrößen wahrzunehmen und auf deren Änderungen in bestimmter Weise zu reagieren; dadurch ist die Erhaltung ihrer Existenz gesichert. Durch die Änderung ihrer Blattstellung entsprechend der Sonneneinstrahlung können manche Pflanzen (■ Kompaßpflanze, Eukalyptusbaum) die Wasserverdunstung wirkungsvoll reduzieren. Das Zusammenrollen mancher Tiere bei entsprechenden Reizen (■ Kugelassel, Igel) dient ebenso der Abwehr einer Gefahr wie die Fluchtreaktion vieler höherer Tiere. Die Wahrnehmung bestimmter Duftkonzentrationen ermöglicht vielen Lebewesen das Auffinden von Nahrungsquellen oder eines Geschlechtspartners.

► *Reizbarkeit ist die Fähigkeit eines Organismus, Änderungen der Umwelt aufzunehmen und widerzuspiegeln, indem er darauf reagiert.*

Reizbarkeit ist eine allgemeine Eigenschaft der lebenden Materie. Sie kann an Reaktionen einzelner Zellen ebenso beobachtet werden wie an Funktionen von Organen oder am Verhalten eines Organismus. Reizbarkeit und Reaktionsfähigkeit sind Voraussetzungen für alle Lebensvorgänge und für die Auseinandersetzung der Organismen mit ihrer Umwelt.

Reize

Schreckstellung bei der Rotbauchunke ▼

Schlafstellung der Blätter des Glücksklees

► *Reize sind physikalische und chemische Größen der Umwelt, die durch Änderung ihrer Energiebeträge auf die lebenden Systeme einwirken.*

■ Ein Druck auf der Haut wird nicht ständig empfunden, sondern erst, wenn er auf eine bestimmte Stärke ansteigt.

■ Gleichbleibende Temperaturen werden kaum wahrgenommen, in der Regel wirkt nur das Ansteigen oder Absinken der Temperatur als Reiz.

Entsprechend ihrer Energieform werden chemische, thermische, osmotische, mechanische, optische und elektrische Reize unterschieden. Manche dieser Energieformen stellen verschiedene Reizarten dar. ①

Mechanische Reize, die insgesamt durch Druckänderungen wirken, können auch als Vibrationen, Dehnungen oder Schall auftreten.

Ob ein tierischer oder pflanzlicher Organismus auf eine bestimmte dieser Änderungen reagiert, hängt vom Vorhandensein entsprechender reizaufnehmender Zellen oder Organellen ab und davon, inwieweit die Änderung in der Umwelt lebenswichtige Funktionen des Organismus berührt.

■ Ein Hund reagiert auf Fleischduft mit dem Beuteverhalten eines Fleischfressers, während Blumenduft diese Reaktion nicht auslöst. Ein Bussard kann, obwohl er sich ebenfalls von Fleisch ernährt, auf Fleischduft nicht reagieren, da ihm die Zellen zur Aufnahme dieses spezifischen Reizes, die Rezeptoren, fehlen. ②

► *Bei Tieren und beim Menschen sind bestimmte Zellen, die Sinneszellen oder Rezeptoren, für die Aufnahme von Reizen spezialisiert.*

Manche Sinneszellen dienen besonders zur Aufnahme von Reizen aus der Umwelt. Sie ermöglichen hauptsächlich die Orientierung des Organismus im Raum. Andere Sinneszellen sind zur Aufnahme von Reizen aus dem Körperinneren spezialisiert (■ Änderung der Muskelspannung, des Blutdruckes, des Salzgehaltes im Blut, der Körpertemperatur).

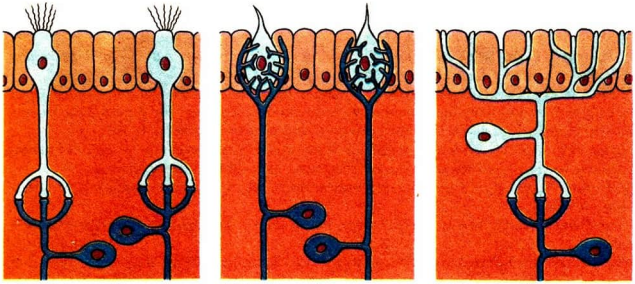
① Erläutern Sie die auf Seite 37 abgebildete Ansammlung von Bakterien am belichteten Chloroplasten unter dem Gesichtspunkt Reizbarkeit! Nennen Sie die Reizart, die auf die Bakterien einwirkt!

② Erklären Sie anhand von selbstgewählten Beispielen die Bedeutung der Reizbarkeit für die Erhaltung des Lebens bei einzelnen Zellen (■ einzellige Tiere oder Pflanzen), an Organen und am vielzelligen Gesamtorganismus!

■ Die aufrechte Körperhaltung des Menschen wird dadurch möglich, daß die Dehnung der Haltemuskulatur des Körpers bei Bewegungen selbst den Reiz für die Anspannung dieser Muskeln bildet.

Sinneszellen sind bei höher entwickelten Organismen in der Regel gemeinsam mit anderen Zellen (■ als Schutz, als Verstärker) in Sinnesorganen konzentriert. Sie nehmen den Reiz direkt oder über freie Nervenendigungen auf und leiten die Reizantwort über Nervenfasern an andere Organe des Organismus weiter.

Sinneszellen können unterschiedlich ausgebildet sein. Nach der Energieform der Reize, auf die die Sinnesorgane spezialisiert sind, werden mechanische Sinne (■ Tastsinn, akustischer Sinn, Strömungssinn, Vibrationssinn, Gleichgewichtssinn, Rotationssinn), chemische Sinne (■ Geruchssinn, Geschmackssinn), Temperatursinn, Lichtsinn und elektrischer Sinn unterschieden.



■ Riechsinneszellen bei Wirbeltieren

■ Hörsinneszellen bei Wirbeltieren

■ Tastsinneszellen bei Wirbeltieren

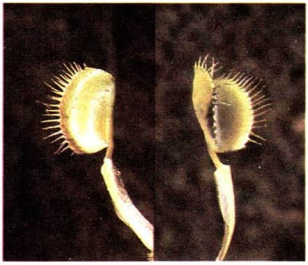
Schematische Darstellung von Sinneszellen

Nicht jede Organismenart besitzt alle diese Sinne. Deshalb reagiert ein Organismus nur auf bestimmte, ausgewählte Vorgänge in seiner Umgebung, während er andere nicht empfinden kann.

■ Der Mensch verfügt nicht über einen elektrischen Sinn, wie ihn manche Fische besitzen, und er kann nicht, wie Bienen und andere Insekten, ultraviolettes Licht wahrnehmen. Mit seinem akustischen Sinn kann der Mensch nicht, wie Fledermäuse und Delphine, im Ultraschallbereich „hören".

Bei Pflanzen sind die Organe der Reizaufnahme weniger differenziert als bei Tieren. Es gibt, vorwiegend für mechanische Reize, Fühlborsten und Sinneshaare. Lichtreize können über undifferenzierte Pflanzenteile aufgenommen werden. Bestimmte Pflanzenteile (■ Spermatozoiden der Farnpflanzen, Wurzelhaare) können chemische Reize aufnehmen. Blüten reagieren häufig auch auf thermische Reize (■ Öffnen der Blüten nur bei bestimmten Temperaturen).

Die primäre Antwort der Sinneszellen auf einen Reiz sind Änderungen bestimmter Membraneigenschaften, die Zustandsänderungen der Zellen zur Folge haben. Die Zustandsänderungen der Sinneszellen werden weitergeleitet, sie lösen im Organismus entsprechende Reaktionen aus.



Fühlborsten an Blättern der Venusfliegenfalle

Tentakel an einem Sonnentaublatt ▼

▶ *Reize rufen in der Regel Reaktionen hervor, die die Änderungen in der Wechselbeziehung von Organismus und Umwelt mehr oder weniger vollständig ausgleichen.*

Fehlen in der Nahrung einer Pflanze oder eines Tieres wichtige Nährstoffe, so zeigen sich als Folgeerscheinung langsam fortschreitende Funktionsstörungen, für die der Organismus keine Reaktionsmöglichkeit hat. Solche Umweltänderungen sind keine Reize.

Jeder Reiz muß eine bestimmte minimale Stärke und Einwirkungsdauer — einen bestimmten Schwellenwert — haben oder stärker sein, um eine Reaktion hervorzurufen.

■ Das Auge kann eine Lichtquelle nur wahrnehmen, wenn diese eine bestimmte Mindesthelligkeit besitzt.

▶ *Der Schwellenwert ist die Energiemenge, durch die ein Reiz gerade noch eine Reaktion auslöst.*

Reize, deren Energiemenge größer ist, als zur Auslösung eines Reizes notwendig wäre, sind überschwellige Reize; Reize, deren Energiemenge zu gering ist, um eine Reaktion auszulösen, sind unterschwellig.

Der Schwellenwert eines Reizes ist abhängig von der Reizintensität und der Reizdauer. Um eine Reaktion auszulösen und als Schwellenreiz zu wirken, benötigen stärkere Reize eine geringere Reizdauer als schwächere Reize.

Der Schwellenwert eines Reizes kann für unterschiedliche Sinneszellen oder Sinnesorgane sehr unterschiedlich sein. Er gibt die Reizschwelle der Zelle an. Die Reizschwelle einer Zelle oder eines Sinnesorgans entspricht derjenigen Energiemenge eines Reizes, die in dieser Zelle gerade noch eine Reaktion auslöst. Die Energieart, auf deren Wahrnehmung ein Sinnesorgan spezialisiert ist, ruft bereits bei einem niedrigen Schwellenwert eine Reaktion hervor.

■ Das Auge, das bei Reizung nur mit Lichtempfindung reagieren kann, vermittelt Lichteindrücke bereits bei bestimmten niedrigen Beleuchtungsstärken. Bei mechanischer Reizung (■ Schlag, Verletzung) werden erst durch wesentlich höhere Energiemengen Lichteindrücke („Sternchen") vermittelt.

Die Reizschwelle des Auges ist gegenüber einem optischen Reiz wesentlich niedriger als gegenüber einem mechanischen Reiz. Gegenüber einem akustischen Reiz ist sie unendlich groß; ein Donnerschlag wird optisch nicht empfunden.

Reize, die an einem Sinnesorgan mit dem niedrigsten Schwellenwert wirksam werden, sind für dieses Sinnesorgan adäquate Reize. Inadäquate Reize wirken entweder nicht oder haben wesentlich höhere Schwellenwerte. Je niedriger die Reizschwelle einer Zelle ist, um so höher ist ihre Empfindlichkeit. ①

■ Bei manchen Fern-Sinnesorganen liegen die Reizschwellen an der Grenze des physikalisch Möglichen. Bei dem Sexuallockstoff Bombykol der Seidenspinner-Weibchen genügt das Auftreffen von etwa einem Molekül auf eine Sinneszelle an der Antenne des Männchens, um eine Reaktion der Sinneszelle auszulösen.

Absolute Schwellenwerte für adäquate Reize bei verschiedenen Sinneswahrnehmungen

Tastsinn	Sonnentau	10^{-12} J	
	Mensch	$3 \cdot 10^{-9}$ J	
Lichtsinn	Mensch	$2 \cdot 10^{-17}$ J	
Akustischer Sinn	Mensch	$5 \cdot 10^{-18}$ J	
Geruchssinn	Seidenspinner	$3 \cdot 10^{-9}$ g/l	(Bombykol)
	Aal	$3 \cdot 10^{-16}$ g/l	(Phenyläthylalkohol)
	Mensch	$4{,}4 \cdot 10^{-14}$ g/l	(Merkaptane, organische, schwefelhaltige Verbindungen)
Geschmackssinn	Mensch	10^{-3} g/l	Saccharin

Nur selten treffen Reize als kurzzeitige Einzelreize in Form kurzer Lichtblitze, stichartiger Berührungen oder von Einzeltönen auf die Zelle. Meist treten Reizfolgen oder Dauerreize auf. Sind einzelne aufeinander folgende Reize unterschwellig, können sie sich summieren und das Überschreiten der Reizschwelle bewirken. Reizsummation kann aber nur erfolgen, wenn der Abstand zwischen den Einzelreizen einen bestimmten Wert nicht über- oder unterschreitet.

■ Der Nies- oder Hustenreflex wird durch Summation von Erregungen auf wiederholte unterschwellige Reizungen der Nasen- oder Rachenschleimhäute ausgelöst.

Von besonderer Bedeutung für die Beziehungen des Organismus zur Umwelt sind die Reaktionen der Sinnesorgane bei Dauerreizen. Wirkt ein Reiz über lange Zeit mit konstanter Stärke, so kann die Reaktion darauf mit fortschreitender Reizzeit abnehmen. Die betreffenden Sinneszellen passen sich dem Reiz an, sie adaptieren, indem sich ihre Reizschwelle erhöht. Die Geschwindigkeit der Adaptation ist bei den einzelnen Sinnesorganen verschieden.

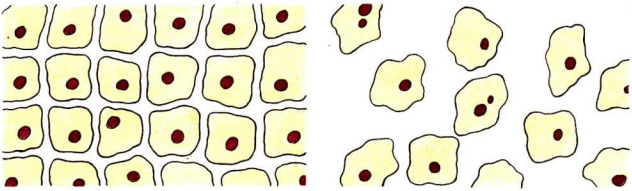
■ Kleidung wird in der Regel bereits wenige Augenblicke nach dem Anziehen schon nicht mehr auf der Haut gespürt.

■ Bei Betreten eines mit Geruchsstoffen erfüllten Raumes wird nach wenigen Minuten der Geruch nicht mehr wahrgenommen. Eine Anpassung an dauernde akustische Reize ist kaum möglich. ②

Die ständige Reizeinwirkung ist für die Wechselbeziehung des Organismus mit seiner Umgebung notwendig. Reizeinwirkung im Bereich der Schwellenstärke ist auch für die Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit der Sinnesorgane wichtig. Insbesondere für die geistige und seelische Entwicklung von Kleinstkindern ist eine intensive Einwirkung von optischen, akustischen und Berührungsreizen erforderlich (■ Sprechen der Mutter, Streicheln). Auch die gesunde Entwicklung bei Jugendlichen und Erwachsenen wird durch die zeitweilige Einwirkung von Reizen, die in ihren Reaktionen die Grenzen der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit erreichen, positiv beeinflußt.

① Erläutern Sie, welche relativen Werte die Reizdauer bei gleichbleibender Reizintensität im Falle eines unterschwelligen, eines überschwelligen und eines Schwellenreizes annimmt! Bringen Sie das mit einem Beispiel aus Ihrer eigenen Erfahrung in Verbindung!

② Erklären Sie die Adaptation eines Sinnesorganes am Beispiel des menschlichen Auges! Benutzen Sie dazu Bio i Ü, S. 104!



Schädigung der Sinneszellen im Innenohr eines Meerschweinchens durch Schallbelastung. Normale Anordnung der Zellen (links), zerstörte Zellen durch Einwirken starker Knalle (rechts)

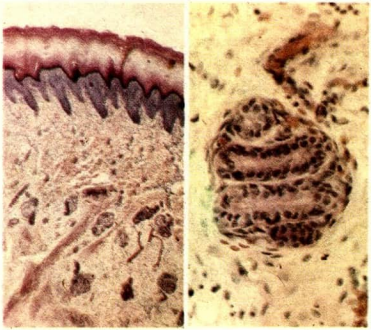
Stark überschwellige oder langandauernde Reize können schädigend auf die Sinneszellen oder auf den gesamten Organismus wirken. Durch Überbeanspruchung des Zellstoffwechsels oder durch direkte Beschädigung können irreversible Schäden an den Sinneszellen oder an den Sinnesorganen eintreten. Intensives kurzwelliges Licht bei Schweißarbeiten kann irreversible Schäden durch Netzhautverätzungen hervorrufen.

Starke Reizüberflutung führt aber vor allem zu physischen und psychischen Beeinflussungen des Organismus. Bei akustischer Reizung können Empfindungen in bestimmte seelische Stimmungen oder Verhaltensweisen übertragen werden. Die Reaktionen auf solche Reizeinwirkungen in Form von Lärm oder Musik sind vor allem von subjektiven Faktoren abhängig und können bei unangenehmen Empfindungen (■ Mißtöne, Überlautstärken) Mißbehagen, Unruhe und Nervosität auslösen. Außerdem treten bei Lärmbelastungen am Schallaufnahmeapparat des Innenohres Schädigungen auf, die zu Minderungen des Hörvermögens (■ Lärmschwerhörigkeit) führen.

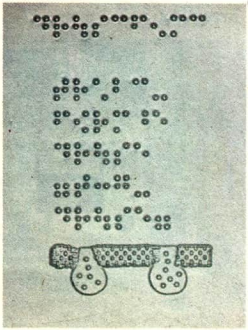
Akustische Reizung wirkt beim Menschen und bei Säugetieren auch auf das vegetative Nervensystem. Bei starker Lärmbelastung werden ähnliche Alarmreaktionen im Organismus ausgelöst, wie sie auch bei anderen starken und schädigenden Belastungen (■ Infektionen, Verletzungen, Schmerz, Angst, Kälte, Hitze) in Erscheinung treten. Solche Reaktionen sind durch besondere Aktivierungen des Hormonsystems, durch Änderungen des Blutbildes und bestimmter Nervenfunktionen ausgezeichnet. Der Organismus befindet sich dabei im Zustand

Lautstärken verschiedener akustischer Reizquellen und entsprechende Reaktionen beim Menschen bei langandauernder Einwirkung

	Dezibel	
Blätterrauschen	20	
	30	
Schreibmaschine	40	psychische Belastung
	50	Nervosität
Großraumbüro	60	Abwehrreaktionen
mittlerer Straßenlärm	70	schädigende Einflüsse auf
	80	Kreislauf, Magen- und
	90	Darmfunktionen
Preßluftbohrer	100	
Discothek	110	Gehörschäden
Motorenprüfstand	120	bleibende Gehörschäden bis
Düsentriebwerke	130	Taubheit nach kurzer Einwirkungszeit



Tastkörperchen (rechts stark vergrößert, 1000 : 1) in der Haut einer Fingerkuppe



Blindenschriftzeichen, deren Anordnung zueinander von den Tastkörperchen der Fingerkuppe erfühlt wird

des „negativen Streß". Häufig wiederkehrende Streßsituationen rufen psychische und vegetative Störungen hervor, sie führen zu Herz- und Kreislaufschäden, Schlafstörungen und Gedächtnisstörungen.

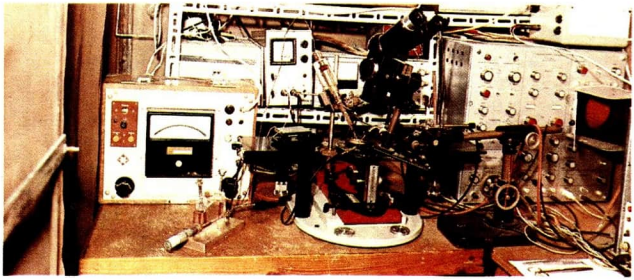
Der Lärmpegel ist in den letzten zehn Jahren in den europäischen Großstädten etwa um 30 % gestiegen. In der DDR befassen sich zahlreiche Institutionen im Interesse der Gesundheit aller Bürger mit Lärmbekämpfung und Lärmschutz am Arbeitsplatz und im öffentlichen Leben. Darüber hinaus sollte jeder einzelne in seinem eigenen Lebensbereich bewußt zur Lärmbekämpfung beitragen.

Schädigungen werden jedoch nur durch starke und dauernde Reizeinflüsse oder Reizüberflutungen verursacht. An Zustandsänderungen der Umgebung, die für den menschlichen Organismus dosierte überschwellige Reize darstellen, versucht sich der Organismus anzupassen. Der Grad dieser Anpassung hängt von der Art des Reizes und von den Reaktionsmöglichkeiten des betreffenden Organismus ab. Die Reize aus der Umwelt veranlassen den Menschen ständig zu Bewegungen, die nicht nur zur Erhaltung der Körperstruktur und deren Funktionen erforderlich sind, sondern auch zur Entwicklung und zum Wachstum im jugendlichen Alter. Fallen diese Beanspruchungen aus, wird die Ausbildung der Muskulatur und der Knochen vernachlässigt; beim Erwachsenen bildet sich die Muskulatur zurück, sie atrophiert. Die Umwelt formt also durch ihr Reizangebot den menschlichen Organismus. Auf der Erkenntnis dieser Beziehung beruhen die Methoden des sportlichen Trainings.

Viele Sportarten fordern schnelle reflektorische Bewegungen (■ Ballspiele, Fechten, Boxen, Turnen). Zur Gewährleistung dieser schnell ablaufenden Reflexe sind leistungsfähige Sinnesorgane erforderlich. Durch Training kann die Sensibilität bestimmter Tastsinneszellen gesteigert werden. Das Lesen der Blindenschrift setzt das Unterscheidungsvermögen von Druckpunkten in 3 mm Abstand mittels der Fingerbeere voraus. Diese Fähigkeit ist erlernbar.

Insbesondere das Gleichgewichtsorgan im Labyrinth des Innenohres kann sich durch Training bei Bergsteigern, Turnern, Seeleuten, Fliegern und Kosmonauten an bestimmte Anforderungen anpassen.

Erregung



Elektrophysiologischer Meßplatz

Reize wirken als Signale, die den lebenden Organismus über Änderungen von Umweltfaktoren informieren, die für ihn lebenswichtig sind. Der Organismus reagiert auf diese Informationen mit den ihm zur Verfügung stehenden Organen oder Strukturen, um sich diesen Änderungen anzupassen. Dazu ist es notwendig, die im Reiz enthaltenen Informationen in körpereigene, systemeigene, Signale umzuwandeln. Diese Umwandlung findet bei Tieren in den Sinneszellen statt, die Weiterleitung der Signale geschieht im Nervensystem. Bei Pflanzen sind in der Regel keine spezialisierten Zellen, die den Sinnes- oder Nervenzellen entsprechen, ausgebildet. Die chemischen und physiologischen Grundvorgänge bei der Reizaufnahme und -umwandlung sind aber im gesamten Organismenreich gleich.

Bei der Reizaufnahme löst die Reizenergie an den Rezeptoren die Erregung aus; der Reiz wird in die Erregung transformiert.

► *Erregungen sind Reizantworten des Nervensystems. Sie können über die Nervenfaser fortgeleitet werden und sind das körpereigene Signal, mit dem Informationen im Nervensystem übertragen werden.*

Bei der Transformation der Reize in körpereigene Signale löst die Reizenergie eine Energiefreisetzung in der Zelle aus, die wesentlich höher ist als die Reizenergie (↗ S. 97). Vor allem bei Sinneszellen ist die aufgenommene Reizenergie viel geringer als die zur Reizreaktion notwendige freigesetzte Energie. Der Vorgang der Informationsübertragung bei der Reizaufnahme ist also gleichzeitig ein biologischer Verstärkervorgang.

► *Die Erregungen widerspiegeln über das Nervensystem im Organismus Umweltänderungen.*

Die Genauigkeit der Widerspiegelung der Umwelt über das Nervensystem nimmt mit steigender phylogenetischer und ontogenetischer Entwicklung zu. Im Zentralnervensystem des erwachsenen Menschen erreicht sie ihre höchste Stufe. ① ②

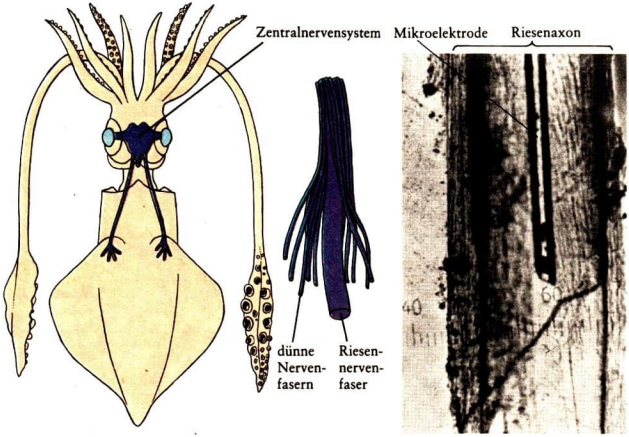
① Erläutern Sie anhand Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 11 die Ausbildung und Höherentwicklung der Nervensysteme bei Gliedertieren und bei Wirbeltieren!

② Begründen Sie aufgrund der Höherentwicklung des Nervensystems im Tierreich die hier getroffenen Aussagen!

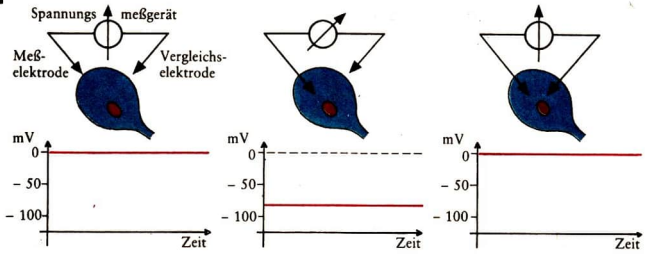
Grundlage der Erregbarkeit ist die Bioelektrizität. Jede lebende Zelle besitzt eine elektrische Ladung. Elektrische Eigenschaften lebender Organismen hat zuerst der italienische Arzt Luigi GALVANI 1794 bei Fröschen nachgewiesen. Heute befaßt sich ein Forschungsgebiet, die Elektrophysiologie, mit der Erforschung der bioelektrischen Erscheinungen.

Die elektrischen Ladungen der Zellen und ihre Veränderungen haben große praktische Bedeutung für die Diagnostik und die Behandlung von Erkrankungen des Nervensystems und der Muskulatur.

Elektrische Ladungen von Zellen werden mit Hilfe von Elektroden aus dünnen Platin- oder Stahldrähten oder besonders dünnen Glaskapillar-Elektroden gemessen. Glaskapillar-Elektroden besitzen Spitzendurchmesser bis zu 0,1 µm und ermöglichen es, einzelne Nervenzellen ohne besondere Beschädigung anzustechen und elektrische Potentiale an der Zellmembran zu messen. Die unter Verwendung empfindlicher Meßinstrumente meßbaren elektrischen Spannungen liegen maximal in der Größenordnung von 100 mV. Nachweise und Untersuchungen von Ladungsänderungen bei Erregungsvorgängen erfordern in der Regel großen technischen Aufwand und besondere experimentelle Geschicklichkeit. Wegen ihrer geringen Größe und der Geschwindigkeit ihres Verlaufes sind sie erst meßbar, seit mit der Erfindung der BROWNschen Röhre und des Elektronenstrahloszillographen Meßgeräte mit ausreichender Empfindlichkeit zur Verfügung stehen. Eine besondere Voraussetzung war die Entdeckung von Riesenneuronen und Riesenaxonen (■ bei Tintenfischen), Nervenzellen und Nervenfasern, die mit fast einem Millimeter Durchmesser das Tausendfache normaler Nervenfasern erreichen.



Riesennervenfaser (Riesenaxon) aus dem Zentralnervensystem eines Tintenfisches; rechts zur Messung des Membranpotentials präpariert und mit einer Meßelektrode versehen



Schema zur Messung des Membranpotentials einer Zelle

Das Ruhepotential. Zwischen dem Zellinneren und dem Äußeren der Zelle besteht eine elektrische Potentialdifferenz, die durch die Zellmembran aufrechterhalten wird.

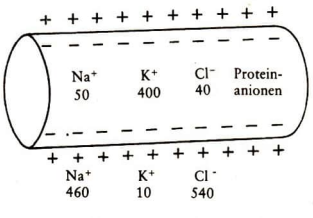
Die Zelle besitzt also ein Membranpotential, das in nicht erregten Zellen das Ruhepotential darstellt. Dabei ist das Zellinnere immer elektronegativ gegenüber dem Außenmilieu der Zelle, bei Nervenzellen erreicht dieses Ruhepotential 60 mV bis 90 mV, bei pflanzlichen Zellen bis über 200 mV.

▶ *Das Ruhepotential ist das bei allen lebenden tierischen und pflanzlichen Zellen im nicht erregten Zustand meßbare Membranpotential.*

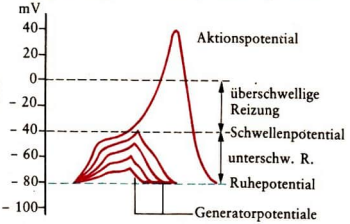
Ursache für das Ruhepotential der Zellen ist die unsymmetrische Verteilung von Ionen zwischen dem Zellplasma und dem extrazellulären Raum.

■ Im Zellinnern ist die Konzentration der Kalium-Ionen wesentlich höher als im Außenmilieu. Die Konzentration der Natrium-Ionen verhält sich bei den meisten tierischen Zellen umgekehrt zu der der Kalium-Ionen. Ähnlich wie die Verteilung der Natrium-Ionen ist die der Kalzium-Ionen bei pflanzlichen Zellen und bei manchen tierischen Zellen. Außerdem sind im Zellplasma die Protein-Anionen stärker konzentriert, im extrazellulären Raum die Chlorid-Anionen.

Die unsymmetrische Ionenverteilung an der Zellmembran wird durch Transportvorgänge bewirkt, für die die Zelle beträchtliche Energiebeträge benötigt. Unter Energiebindung werden



Schematische Darstellung der Ionenverteilung im Zellinnern und im extrazellulären Raum (am Axon eines Tintenfisches; Angaben in mmol/l)



Ausbildung von Potentialen bei unterschiedlich starker Reizung

Natrium-Ionen ständig aus der Zelle hinaus- und Kalium-Ionen in die Zelle hineinbefördert, also entgegen der jeweiligen Konzentrationsdifferenz der Natrium- und Kalium-Ionen.

Diese Vorgänge werden bildhaft als „Ionenpumpen" bezeichnet. Die Energie für diese Pumpvorgänge stammt aus dem Zellstoffwechsel.

■ Werden durch Vergiftung die Atmungsprozesse der Zelle eingeschränkt oder bei Ersatz des Sauerstoffes durch Stickstoff der Stoffwechsel geschädigt, so wird nicht genügend Energie freigesetzt, und das Ruhepotential einer Nervenzelle sinkt bis auf Null ab. Der Sauerstoffbedarf des Nervensystems zur Freisetzung der notwendigen Energiemengen ist sehr hoch. Das Gehirn des Menschen verbraucht 20 % des Gesamtbedarfes des Organismus an Sauerstoff.

Da im Nervensystem die Fähigkeit zur Speicherung von Reservestoffen gering ist, müssen ständig Stoffe zur Aufrechterhaltung der Lebensvorgänge in starkem Maße über das Blut herantransportiert werden. Unterbrechung dieser Zufuhr führt schon nach wenigen Sekunden zu Funktionsmängeln und nach wenigen Minuten zu irreversiblen Schäden. ①

Die unsymmetrische Ionenverteilung an den Zellmembranen beruht außer auf den Ionentransportvorgängen auch auf der unterschiedlichen Durchlässigkeit, der Permeabilität, der Membranen für die Ionen.

■ Kalium-Ionen diffundieren etwa 100mal stärker als Natrium-Ionen von innen nach außen (/ S. 102, Abb. unten links). Organische Anionen bleiben in der Zelle zurück.

▶ *Das Ungleichgewicht der Ionen erzeugt eine Polarisierung der Zellmembran.*

Die Membran erhält durch die Polarisierung die für das Ruhepotential charakteristische positive Ladung auf der Außenseite und die negative Ladung auf der Innenseite. ②

Das Aktionspotential. Wird eine erregbare Zelle von einem unterschwelligen Reiz getroffen, verringert sich der Spannungswert des Ruhepotentials um wenige Millivolt. Es entsteht ein Generatorpotential.

Wird bei einem stärkeren Reiz der Spannungsabfall so groß, daß der Spannungswert des entstandenen Generatorpotentials unter einen bestimmten Wert, das Schwellenpotential, sinkt, so entsteht an der Nervenfaser ein Aktionspotential.

Diesem Vorgang liegen komplizierte physikalische und biochemische Vorgänge zugrunde.

Wird das Schwellenpotential an einer Nervenfaser überschritten, steigt die Durchlässigkeit der Membran für Natrium-Ionen schlagartig auf das 500fache an. Die Natrium-Ionen strömen entsprechend ihrem Konzentrationsgefälle augenblicklich in starkem Maße in die Zelle ein. Damit findet eine Umverteilung der elektrischen Ladungen an der Zellmembran, eine Depolarisation, statt.

Das Eindringen positiver Ladungsträger (Natrium-Ionen) bewirkt ein Absinken des negativen Membranruhepotentials auf Null und ein vorübergehendes kurzes Ansteigen auf positive Spannungswerte. Die Innenseite der Membran wird jetzt positiv, die Außenseite negativ.

▶ *Das Aktionspotential ist eine durch einen Reiz hervorgerufene kurzzeitige Änderung des Membranpotentials.*

Gleichzeitig mit dem starken Natrium-Ionen-Einstrom wird die Natriumpumpe aktiviert, die die eingedrungenen Natrium-Ionen sehr rasch aus der Zelle hinaustransportiert.

Gleichzeitig werden auch Kalium-Ionen, die aufgrund der Änderung der Membranpermeabilität aus der Zelle heraus gelangt sind, wieder zurückgepumpt.

① Erörtern Sie Zusammenhänge zwischen Erregung und Stoffwechsel!

② Erläutern Sie Voraussetzungen und Mechanismen bei der Entstehung eines Ruhepotentials!

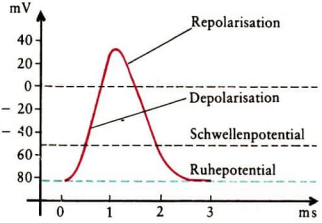
Durch die Rückführung des Membranpotentials auf den Wert des Ruhepotentials wird die Membran repolarisiert.

► *Der Erregungsvorgang besteht in einem Wechsel von Depolarisation und Repolarisation der Zellmembran.*

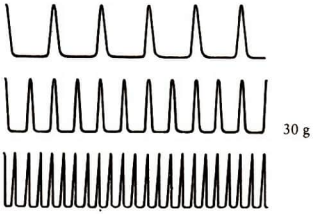
Alle Vorgänge, die bei der Bildung des Aktionspotentials beteiligt sind, laufen außerordentlich schnell ab. Die Depolarisation, also der Aufbau des Aktionspotentials, dauert höchstens 1 ms, die Repolarisation, die Wiederherstellung des Ruhepotentials, etwa 3 ms. Danach ist die Membran wieder für eine neue Erregungsbildung bereit.

Aktionspotentiale treten, unabhängig von der Stärke des überschwelligen Reizes, mit dem sie ausgelöst werden, immer in ihrer vollen Größe auf. Sie folgen dem „Alles-oder-Nichts-Gesetz". ① ②

Das Aktionspotential wird als Nervenimpuls über die Nervenfaser fortgeleitet. Es ist das einheitliche Signal bei der Informationsübermittlung im Nervensystem.



Zeitlicher Verlauf eines Aktionspotentials in einer Nervenfaser



Folgen von Aktionspotentialen bei unterschiedlichen Reizstärken in Drucksinneszellen im Sohlenballen einer Katze

Die Information über die Reizintensität, mit der die Erregung ausgelöst wurde, ist in der Anzahl der Aktionspotentiale, die in der Zeiteinheit gebildet und über die Nervenfaser fortgeleitet werden, verschlüsselt. Starke Reize bewirken eine dichtere Folge von Aktionspotentialen als schwächere.

Die Erregungsleitung. An der erregten Stelle der Nervenfaser ist durch Depolarisation die Außenseite der Membran negativ, die Innenseite positiv geladen. Die benachbarte unerregte Stelle ist infolge des dort vorhandenen Ruhepotentials an der Außenseite der Membran positiv, an der Innenseite negativ geladen. Zwischen erregtem und unerregtem Abschnitt treten also Potentialunterschiede auf, die sich durch das Fließen lokaler Ströme ausgleichen.

Dadurch wird der bisher unerregte benachbarte Membranbereich bis zum Schwellenpotential depolarisiert. An dieser Stelle entsteht jetzt ein Aktionspotential, während der

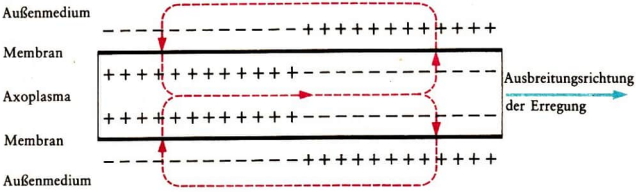
① Erläutern Sie an der Darstellung eines Aktionspotentials die spezifischen Ionenvorgänge in den einzelnen Phasen des Aktionspotentials!

② Erläutern Sie die Begriffe Membranpotential, Ruhepotential, Aktionspotential! Stellen Sie wesentliche Unterschiede zwischen ihnen heraus!

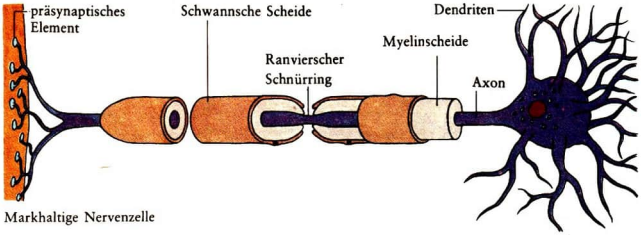
③ Erklären Sie die Ausbreitung einer Erregung in der Nervenfaser in nur einer Richtung; beachten Sie dabei die unterschiedliche Geschwindigkeit von Depolarisation und Repolarisation!

vorher erregte Membranbereich bereits wieder repolarisiert wird. Durch diese aufeinanderfolgenden Depolarisierungen jeweils benachbarter Membranbereiche kann sich die Erregung kontinuierlich über die Nervenfaser fortpflanzen. ③

Eine kontinuierliche Erregungsfortpflanzung findet nur bei marklosen Nervenfasern statt. Die markhaltigen Fasern der Wirbeltiere besitzen eine Myelinscheide, die durch die Ranvierschen Schnürringe in 1 mm bis 2 mm Abständen unterbrochen ist.



Schematische Darstellung des Verlaufs der lokalen Membranströme zwischen erregtem und unerregtem Abschnitt in einer Nervenfaser



Markhaltige Nervenzelle

Die Myelinscheide wirkt als starker Isolator. Die Membran der Nervenfaser wird nur an den Schnürringen erregbar, weil dort der Isolator fehlt und der Kontakt der Membran mit dem Außenmilieu direkt gegeben ist. Die Ausgleichsströme zwischen der erregten Stelle am Schnürring und der benachbarten unerregten Stelle müssen in der Faser bis zum nächsten Schnürring fließen, bis sie eine neue Depolarisation der Membran auslösen können. Die Erregung breitet sich sprungartig von Schnürring zu Schnürring aus. Die Vorteile dieser Erregungsleitung bestehen in

— hoher Leitungsgeschwindigkeit, weil die zwischen den Schnürringen liegenden Abschnitte der Faser ohne aktive Beteiligung der Zellmembran, mit einfacher elektrischer Leitung, überwunden werden,

— geringem Bedarf an Stoffwechselenergie, da nur an den Schnürringen Transportvorgänge für Ionen stattfinden.

Zwischen den Leitungsvorgängen in der Nervenfaser und in elektrischen Kabeln lassen sich gewisse Ähnlichkeiten feststellen. Der grundlegende Unterschied besteht darin, daß im elektrischen Kabel die Leitung durch Elektronenbewegungen, in der Nervenfaser durch

Ionenbewegung erfolgt. Außerdem verläuft die Erregungsleitung in Nervenfasern langsamer, weil die wiederholte Depolarisation der Membran bei der Bildung der Aktionspotentiale eine bestimmte Zeit erfordert und weil der elektrische Widerstand in den Nervenfasern relativ hoch ist. Die höchste Leitungsgeschwindigkeit in Nervenfasern liegt bei 120 m/s. Dabei werden in einer Millisekunde 60 bis 100 Schnürringe durchlaufen. ①②

Erregungen werden nur selten über eine einzelne Nervenfaser fortgeleitet, da in der Regel mehrere Zellen von einem Reiz getroffen werden. Die Nervenfasern gleichartiger Sinneszellen oder Nervenzellen sind in Nerven zusammengefaßt. Die Erregungsleitung erfolgt bei Tieren mit zentralisiertem Nervensystem durch Empfindungsnerven, sensible Nerven, von den Sinnesrezeptoren zum Zentralnervensystem und durch Bewegungsnerven, motorische Nerven, weiter zu den Erfolgsorganen. ③

■ Geschwindigkeit der Erregungsleitung

Art	Gewebe bzw. Organ	Geschwindigkeit ($m \cdot s^{-1}$)	Art	Gewebe bzw. Organ	Geschwindigkeit ($m \cdot s^{-1}$)
Zaunrübe	Ranken	$7 \cdot 10^{-5}$	Regenwurm	Bauchmarknerv	0,60
Sonnentau	Blattrandtentakeln	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$		Riesennervenfaser	17 bis 25
Mimose	Blätter	10^{-1} bis 10^{-2}	Frosch	Skelettmuskel	3
Venusfliegenfalle	Fühlborste	0,06 bis 0,20		Ischiasnerv	25
Teichmuschel	Nerv	0,01 bis 0,05	Pferd	markloser Nerv	8
Meduse	Nervennetz	0,24		markhaltiger Nerv	30
			Mensch	Skelettmuskel	10
				markhaltiger Nerv	80 bis 120

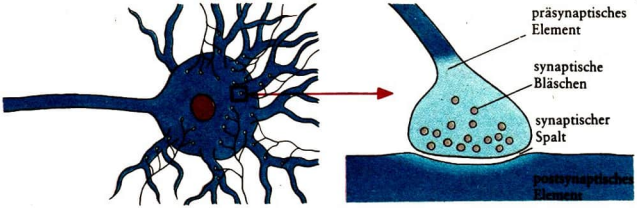
Auch in Pflanzen werden Erregungen weitergeleitet, allerdings mit wesentlich geringerer Geschwindigkeit als bei Tieren. Bevorzugt verläuft diese Ausbreitung entlang der Leitbündel. Die Aktionspotentiale erregen hier ebenfalls die benachbarten Membranbereiche, wodurch kontinuierlich die Erregung weitergeleitet wird. Darüber hinaus gibt es bei Pflanzen chemischen Signaltransport durch Erregungssubstanzen, die über die Leitbündel vom Ort der Erregung aus über die ganze Pflanze durch Diffusion verteilt werden. Erreicht die Aktionssubstanz reaktionsfähige Zellen, so werden diese erregt. Auch das Wachstumshormon Auxin dient als Signalüberträger. ④

Die Erregungsübertragung. Im Verlauf der Erregungsleitung werden die Erregungen von einer Zelle auf andere Zellen übertragen. Das geschieht an den Synapsen.

► *Synapsen sind Kontaktstellen, an denen Erregungen von einer Nervenzelle auf eine andere Nervenzelle oder auf eine Muskelzelle übertragen werden.*

Die Form der Synapsen ist sehr vielgestaltig. Der Teil der Synapse, in dem die Erregung ankommt, ist das präsynaptische Element. Es hat oft die Form einer knopfartigen Anschwellung und wird von den Endverzweigungen der Nervenfaser gebildet. Der Teil, der die Erregung von der Synapse abführt, ist das postsynaptische Element. Dieses kann eine andere Nervenzelle oder eine Muskelfaser sein. Prä- und postsynaptisches Element sind durch den etwa 20 nm breiten synaptischen Spalt getrennt.

An den Synapsen wird die Erregung in der Regel chemisch übertragen. Trifft im Verlauf der Erregungsleitung ein Aktionspotential im präsynaptischen Element ein, setzt es dort aus den im Zellplasma befindlichen synaptischen Bläschen eine Überträgersubstanz frei



Synapsen an einer Nervenzelle, von Nervenfasern anderer Nervenzellen gebildet (links) und Bau einer Synapse (rechts)

(■ Azetylcholin, Noradrenalin). Die Überträgersubstanz diffundiert durch den synaptischen Spalt zur postsynaptischen Membran. Hier finden die gleichen Vorgänge wie bei der Erregungsbildung an der Membran der Nervenfaser statt. Geringe, unterschwellige Mengen der Überträgersubstanz setzen den Spannungswert des Membranpotentials nur unbedeutend herab (↗ S. 103). Reicht die Stoffmenge aus, um das Schwellenpotential zu überschreiten, wird ein Aktionspotential ausgelöst, das dann über die postsynaptische Zelle fortgeleitet werden kann. Die Erregungsübertragung an Synapsen benötigt 1 ms bis 2 ms Zeit.

Es gibt aber auch Überträgersubstanzen, die das Ruhepotential des postsynaptischen Elementes erhöhen. Dadurch wird die Auslösung eines Aktionspotentials im postsynaptischen Element verhindert und die Weiterleitung der Erregung gehemmt. Durch das sinnvolle Zusammenwirken von solchen hemmenden und fördernden Synapsen wird die harmonische Funktion des Zentralnervensystems gewährleistet. ⑤

Die Kenntnis der Funktion der Synapsen ist von großer Wichtigkeit für die Medizin.

Vorgänge der Erregungsübertragung an Synapsen gehören zu den biologischen Grundlagen des Gedächtnisses. So wird vermutet, daß bei Lernvorgängen die Anzahl bestimmter Synapsen vergrößert wird. Viele Arzneimittel, Genußmittel und Gifte beeinflussen die Tätigkeit von Synapsen.

■ Nikotin und Rauschgifte schädigen in hohem Maße bestimmte Synapsen, indem sie diese unphysiologisch reizen und ihren Stoffwechsel schädigen oder erschöpfen. Der Gebrauch solcher Mittel kann durch die Minderung oder den Ausfall von Erregungsübertragungen zu bleibenden Schäden (■ des Nervensystems, des Kreislaufsystems) führen und den Tod verursachen.

① Stellen Sie in einer tabellarischen Übersicht Voraussetzungen und Mechanismen der Erregungsleitung in marklosen und markhaltigen Nervenfasern zusammen!

② Erklären Sie die Erregungsleitung als Weiterleitung der Negativität an der Außenseite der Membran!

③ Beschreiben Sie den Weg der Erregungsleitung beim Menschen!

④ Vergleichen Sie nach auszuwählenden Gesichtspunkten die Erregungsleitung bei Pflanzen mit der bei Tieren! Geben Sie eine tabellarische Übersicht!

⑤ Erläutern Sie die Rolle der Synapsen für die Funktion des Nervensystems!

Reaktion

Süßwasserpolyp in gereiztem Zustand (150:1)

Mimose; links unten, mitte oben gereizte Blätter

Die Wirksamkeit eines Reizes zeigt sich in der Reaktion des gereizten Organismus.

Die Reaktion ist die Beantwortung eines Reizes durch einen Organismus.

In den reizaufnehmenden Zellen wird die Reizenergie in eine andere, stärkere Energieform, die Erregung, transformiert. Wenn die reizaufnehmende Zelle selbst zu einer Reaktion fähig ist, verfügt sie auch über die zur Reaktion notwendige Energie aus ihrem Stoffwechsel. Das ist bei Einzellern der Fall. Bei Vielzellern muß die Erregung meist zu einer vom Reizaufnahmeort entfernten Stelle im Organismus geleitet werden, um reaktionsfähige Zellen zu erreichen. Reaktionsfähige Zellen sind Nervenzellen, Muskelzellen und Drüsenzellen. Dort erfolgt eine Transformation der Erregungsenergie in die Reaktionsenergie. Dabei besteht folgende Reaktionskette: Reiz ⟶ Reizaufnahme (Rezeptorzelle) ⟶ Erregung (Nervenzelle) ⟶ Erregungsleitung (Nervenfaser) ⟶ Erregungsübertragung (Synapse) ⟶ Reaktion (■ Muskulatur).

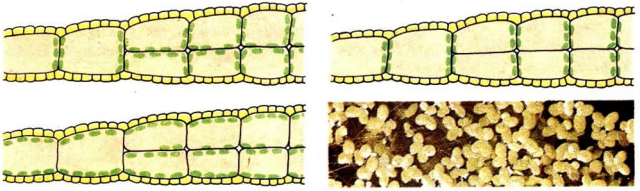
Je nach der Entwicklungshöhe des jeweiligen Organismus verfügt dieser über nur wenige oder aber über eine Vielzahl von Reaktionsmöglichkeiten. Protozoen zeigen in der Regel unabhängig von der Art des Reizes gleichartige Reaktionen.

■ Amöben ziehen ihre Scheinfüßchen ein, gleichgültig, ob sie mechanisch, chemisch oder optisch gereizt werden. Pantoffeltierchen reagieren auf elektrische, chemische oder optische Reize stets nur mit Änderung ihrer Bewegungsrichtung.

Im Verlaufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung und der zunehmenden Differenzierung der Zellen und Gewebe vergrößert sich die Anzahl der Reaktionsmöglichkeiten der Organismen. Hochentwickelte Tiere beantworten unterschiedliche Reizarten mit jeweils verschiedenen und spezifischen Reaktionen. Diese Reaktionen können bei Drüsenzellen in Änderungen des Stoffwechsels und der Sekretabgabe, bei Nervenzellen in der Bildung von Erregungen, bei Muskelzellen in Formänderungen und in Bewegungen bestehen; sie können sich auch als Änderungen des physiologischen Zustands eines Organismus äußern (■ Übergang zur generativen Phase bei Pflanzen durch Lichteinwirkung). ① ②

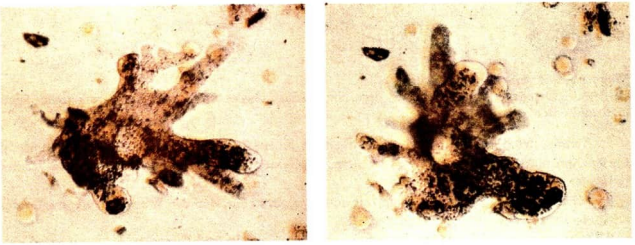
Bewegungen sind die auffälligsten Reaktionen. Sie sind besonders deutlich bei Tieren zu beobachten; aber auch Pflanzen reagieren auf Reize mit Bewegungen. Aufgrund der ortsfesten Lebensweise der Pflanzen bleiben bei ihnen die Bewegungen auf einzelne Pflanzenteile beschränkt. Die Fähigkeit zu Eigenbewegungen ist eine der Grundeigenschaften der lebenden Materie. Das wird besonders deutlich bei Plasmabewegungen.

Plasmabewegungen. Die Plasmaströmung wurde in nahezu allen Zelltypen nachgewiesen. In vielen Zellen ist sie so langsam, daß sie nur mit den technischen Mitteln der Zeitraffung zu erkennen ist. In pflanzlichen Zellen ist sie vielfach im Mikroskop direkt an der Mitbewegung der Plasmaeinschlüsse zu beobachten.



Durch unterschiedliche Beleuchtung geänderte Lage der Chloroplasten in den Blattzellen von Wasserlinsen durch Plasmaströmung: Lage bei Dunkelheit (links oben), bei schwachem Licht (links unten), bei starkem Licht (rechts oben). Kleine Wasserlinse (*Lemna minor*; rechts unten)

Besonders deutlich ist die Plasmabewegung bei Amöben. ③



Bildung von Scheinfüßchen während der Plasmabewegung einer Amöbe

Amöben-ähnliche (amöboide) Bewegungen sind charakteristisch für niederste Organismen. Einige Zelltypen höherer Tiere haben die Eigenschaft der amöboiden Beweglichkeit bewahrt. Viele Tierstämme besitzen Wanderzellen, die, ähnlich wie die Amöben, frei beweglich sind. Diese Amöbozyten spielen beim Stofftransport im Organismus eine Rolle. Hierzu gehören die weißen Blutkörperchen.

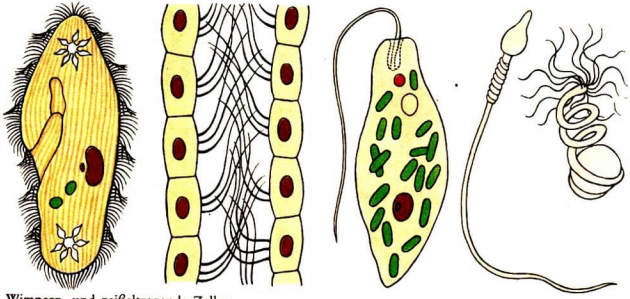
① Erläutern Sie die Bedeutung von adäquaten Lichtreizen bei der Blütenbildung von Lang- und Kurztagspflanzen!

② Setzen Sie die Angepaßtheit von Pflanzen an bestimmte Bodenreaktionen in Beziehung zu ihrer Reaktionsfähigkeit gegenüber chemischen Reizen!

③ Beschreiben Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 11 den Verlauf der Plasmabewegung bei Amöben sowie ihre Funktion!

Flimmerbewegungen. Flimmerbewegungen kommen bei vielen einzelligen Organismen (■ Wimpertierchen, Kugelalge), aber auch bei Epithelien in den Körperhohlräumen vielzelliger Tiere (■ Nasenhöhle, Eileiter) vor.
Zahlreiche Bakterien und manche Protozoen (■ Geißeltierchen) sowie die Mehrzahl der männlichen Fortpflanzungszellen bewegen sich mit Hilfe von Geißeln fort.

► *Flimmerbewegungen werden durch Geißeln und Wimpern hervorgerufen; sie ermöglichen die Fortbewegung frei im Wasser beweglicher einzelliger und wenigzelliger Organismen und Geschlechtszellen sowie die Bewegung und den Transport von Nahrungsteilchen und Fremdkörpern.*

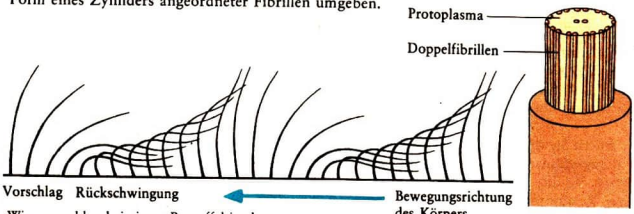


Wimpern- und geißeltragende Zellen
(■ Pantoffeltierchen, Epithelzellen aus dem Nierenkanal, Euglena, menschliche Spermienzelle, Spermatozoid eines Farns)

Stofftransport durch Flimmerbewegungen im Körperinneren wird durch die Schleimhaut im Rachenraum, in der Luftröhre, im Darm, an Kiemen, in den Nierenkanälen und im Eileiter realisiert.

■ Muscheln gewinnen ihre Nahrung mit dem Wasserstrom, den die Wimperbewegungen des Kiemen- und Mantelepithels verursachen.

Alle im Tier- und Pflanzenreich vorkommenden Geißeln und Wimpern besitzen einen einheitlichen Aufbau. Stets wird ein Paar zentral gelegener Fibrillen von neun Paar randständig in Form eines Zylinders angeordneter Fibrillen umgeben.



Wimpernschlag bei einem Pantoffeltierchen

Aufbau einer Wimper

Alle Flimmerbewegungen erfolgen nach bestimmten artspezifischen Mustern. Die Wimpern einer Zelle oder eines Wimpernepithels schlagen nicht unabhängig voneinander, sondern ihr Schlag ist untereinander abgestimmt. Auf den raschen Schlag einer Wimper folgt ein langsames Aufrichten. Der Schlag einer Wimper wirkt als Reiz für die benachbarte. Die erste Wimper ist somit der „Schrittmacher" und bestimmt den Schlagrhythmus einer ganzen Reihe.

Wimpernepithelien werden durch das Nervensystem nicht beeinflußt. Bei ihnen schlagen die Wimpern ständig mit gleichbleibender Stärke und in gleicher Richtung.

■ Die Wimpern im Schlund des Frosches schlagen 10- bis 17mal in der Sekunde.

Einzellige Organismen (■ Pantoffeltierchen) können dagegen sowohl die Schlagintensität als auch die Schlagrichtung ihrer Wimpern ändern.

Muskelbewegungen. Muskelzellen treten im gesamten Tierreich auf; meist sind sie zu Muskeln oder muskulären Organen (■ Darm, Magen) vereinigt. Werden Muskeln erregt, kontrahieren sie sich.

▶ *Muskelbewegungen werden durch Erregungen ausgelöst.*

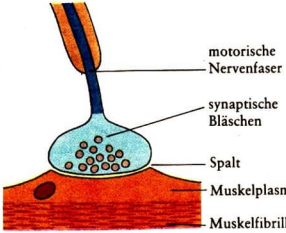
Die Erregung wird von der motorischen Nervenfaser auf einen Muskel übertragen. Diese Weitergabe der Erregung verläuft an einer neuromuskulären Synapse, der motorischen Endplatte.

Der motorische Nerv ist an der motorischen Endplatte das präsynaptische Element. Die Übertragung der Erregung erfolgt durch Abgabe einer chemischen Überträgersubstanz aus den synaptischen Bläschen des Nerven in den synaptischen Spalt. Die am häufigsten vorkommende Überträgersubstanz an motorischen Endplatten ist das Azetylcholin.

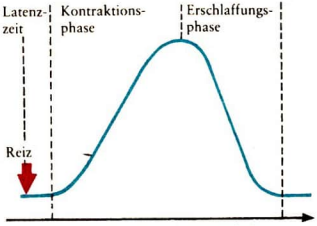
Es bewirkt Änderung der Ionen-Durchlässigkeit in der Membran der Muskelfaser. An der Membran der Muskelfaser finden dabei ähnliche Ionenaustauschvorgänge wie bei der Erregung der Nerven statt.

Jeder Nervenimpuls erzeugt mit Hilfe des Azetylcholins in der Endplatte ein Generatorpotential (↗ S. 103). Je mehr Nervenimpulse an der Synapse ankommen, desto größer ist die Menge des Azetylcholins, das in den synaptischen Spalt abgegeben wird. Bei bestimmten Mengen von Azetylcholin wird das Schwellenpotential unterschritten; es wird ein Aktionspotential in der Muskelfaser ausgelöst. Wie die Nervenzellen reagieren auch die Muskelfasern entsprechend dem Alles-oder-Nichts-Gesetz.

Auf einen überschwelligen Reiz reagiert der Muskel mit einer Zuckung.



Schematische Darstellung einer motorischen Endplatte



Ablauf der Einzelzuckung eines Muskels

Eine Muskelzuckung umfaßt drei Phasen:
— Die Latenzzeit, die vom Beginn des Reizes bis zum Einsetzen der Kontraktion dauert; beim quergestreiften Muskel beträgt sie 0,001 s bis 0,01 s.
— Die Kontraktionsphase, in der der Muskel durch das Zusammenziehen Arbeit leistet; abhängig von der Art des Muskels dauert sie 0,01 s bis 0,05 s.
— Die Erschlaffungsphase, in der der Muskel zu seiner ursprünglichen Länge erschlafft und seine Ausgangsspannung wieder erreicht; sie dauert etwa 0,02 s.

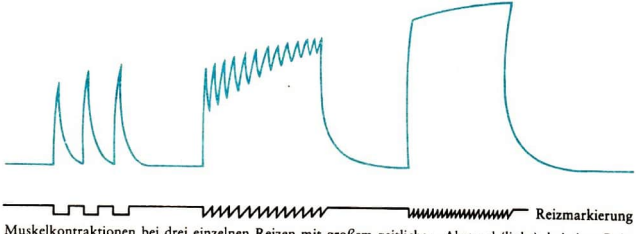
▶ *Latenzzeit und Kontraktionsphase bilden die Arbeitsphase des Muskels, die Erschlaffung ist die Erholungsphase.*

Der gesamte Zuckungsvorgang ist temperaturabhängig. Bei höheren Temperaturen laufen die Stoffwechselvorgänge im Muskel schneller ab. Die Latenzzeit verkürzt sich, und die Kontraktion verläuft rascher.

■ Sportler nutzen diese Erkenntnis beim „Warmmachen" vor einem Start aus.

In der Kontraktionsphase ist der Muskel gegenüber einer weiteren Reizung unempfindlich. Folgen Einzelreize jeweils in größerem zeitlichem Abstand aufeinander, antwortet der Muskel auf jeden von ihnen mit einer Einzelzuckung. Wird der Abstand zwischen einzelnen Reizen so verkürzt, daß der Folgereiz eintrifft, bevor die Erschlaffungsphase der vorhergehenden Zuckung beendet ist, kommt es zur Überlagerung der aufeinander folgenden Kontraktionen. Es tritt eine flimmernde Dauerkontraktion ein, der unvollkommene Tetanus. Verkürzt sich der Abstand der Reize noch weiter, so daß der folgende Reiz in den Anfang der Erschlaffungsphase der vorangehenden Zuckung fällt, verschmelzen die Einzelzuckungen zu einer glatten Dauerkontraktion, einem vollkommenen Tetanus. Der vollkommene Tetanus tritt bei einer Reizfrequenz von 50/s ein.

▶ *Entsprechend der Reizfrequenz reagiert der Muskel mit Einzelzuckungen, unvollkommenem oder vollkommenem Tetanus.*



Muskelkontraktionen bei drei einzelnen Reizen mit großem zeitlichem Abstand (links), bei einer Reizserie von 20 Reizen/s (Mitte) und bei 50 Reizen/s (rechts)

Da die motorischen Nerven bei Erregung stets Serien von Impulsen zu den motorischen Endplatten leiten, führen die Muskeln im Körper in der Regel Dauerkontraktionen aus (■ Kontraktionen der Haltemuskulatur des Skeletts). Einzelzuckungen sind selten und treten nur als reflektorische Zuckungen auf.

① Entwickeln Sie aus dem Text der Seiten 112 und 113 eine Definition der Begriffe Tetanus und Tonus!

② Erläutern Sie anhand der Abbildung Seite 113 die strukturellen Veränderungen im Muskel bei der Kontraktion!

Ein Tetanus wird nur so lange aufrechterhalten, wie die Reizung erfolgt. Danach erschlafft der Muskel wieder zu seinem ursprünglichen Zustand.

Aber die intensiven Stoffwechselvorgänge während der Dauerkontraktion bedingen Erholungsphasen des Muskels. Bei entsprechender Dauer eines Tetanus läßt deshalb die Kontraktion auch bei gleichbleibender Reizung allmählich nach.

Auch wenn ruhende Skelettmuskeln keine Kontraktion zeigen, befinden sie sich immer in einem bestimmten Spannungszustand, der durch eine geringe Anzahl von Nervenimpulsen über motorische Nerven aufrechterhalten wird. Dieser Spannungszustand, unter dem die Skelettmuskulatur ständig steht, ist der Tonus. Durch die vom Nervensystem fortlaufend eintreffenden Erregungen sind bei vielen Muskeln zu jedem Zeitpunkt einige wenige Fasern erregt. Diese werden sofort danach durch andere Fasern abgelöst. ①

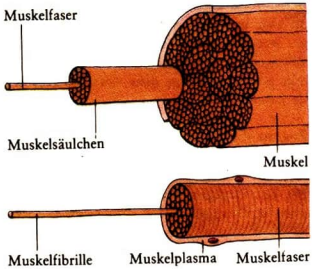
Dieser Tonus, der Haltetonus der Muskulatur, ist beim gesunden Menschen höher als beim kranken und schwachen; er beeinflußt deutlich die Körperhaltung.

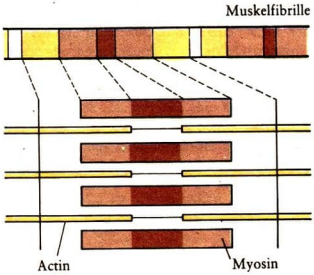
■ Der Unterkiefer wird durch den Tonus der Kaumuskeln gehalten. Läßt der Tonus nach, sinkt der Unterkiefer herab, was häufig im Schlaf zu beobachten ist.

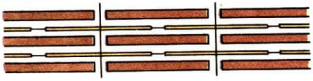
Organe mit glatter Muskulatur benötigen für ihren Tonus keine Nervenerregungen. Der Dauertonus dieser Organe (■ Herz, Magen, Harnblase, Gebärmutter) stellt sich gegen einen ständig herrschenden Innendruck ein. Die Magenmuskulatur zeigt eine annähernd gleichbleibende Spannung, unabhängig vom Füllungszustand des Magens. Ähnliche Verhältnisse gelten auch für die Muskeln in der Körperwand zahlreicher wirbelloser Tiere.

Die Energie für die Muskelkontraktion stammt aus dem Stoffwechsel. Dabei erfolgt eine Umwandlung chemischer Energie in mechanische Arbeit.

Die Kontraktion der Muskeln beruht auf reversiblen Veränderungen der Muskeleiweiße Aktin und Myosin. Beide Muskeleiweiße liegen in Form von Fadenstrukturen vor. Ihre Anordnung bewirkt die charakteristische Querstreifung der Muskelfasern. Im Verlauf der Kontraktion ändert sich die strukturelle Anordnung der Muskeleiweiße zueinander.







Aufbau eines Muskels
Muskelkontraktion durch energiebindende Verschiebung der Muskeleiweiße

Die chemische Energie wird vorwiegend beim Abbau der Kohlenhydrate Glukose und Glykogen frei, sie wird nicht direkt für die Muskelkontraktion verwendet, sondern in ATP gespeichert. Das ATP wird bei der Muskelkontraktion unmittelbar verbraucht und unter Abgabe von 33,6 kJ · mol^{-1} zu ADP gespalten.

► *Das Ineinandergleiten der Muskeleiweiße bei der Kontraktion ist ein energiebindender Vorgang.*

$$ATP + H_2O \underset{\text{Energiebindung}}{\overset{\text{Energiefreisetzung}}{\rightleftharpoons}} ADP + \text{Phosphat}$$

Der ATP-Vorrat des Muskels ist nicht groß und reicht nur für wenige Kontraktionen. Trainierte Muskeln verfügen jedoch über höhere ATP-Vorräte als untrainierte. Das verbrauchte ATP muß schnell regeneriert werden. Die dazu erforderliche Energie gewinnt die Muskelfaser aus einem anderen energiereichen Phosphat, das bei seiner Spaltung Energie zur Rückgewinnung von ATP liefert. Zusätzlich verwendet die Muskelfaser auch das ATP, das ständig im Verlauf der Atmungskette entsteht.

► *Die für die Arbeitsphase des Muskels benötigte Energie wird durch Atmungs- und Gärungsvorgänge freigesetzt und in ATP sowie anderen Phosphaten gespeichert.*

Innerhalb der Atmungskette werden die Kohlenhydrate unter Sauerstoffverbrauch über Brenztraubensäure vollständig zu Kohlendioxid und Wasser oxydiert. Bei intensiver Muskelarbeit reicht die Sauerstoffversorgung des Muskels jedoch nicht mehr zu dieser Kohlenhydratoxydation aus. Der dann einsetzende anaerobe Abbau führt über Brenztraubensäure durch Reduktion zur Milchsäure. Der Energiewechsel ist dabei 15mal geringer als beim aeroben Abbau. Die Milchsäure häuft sich im Muskel an und diffundiert während der Erholungsphase ins Blut. Der größte Teil der Milchsäure wird in der Leber wieder zu Glykogen umgewandelt. Der Rest wird nach abgeklungener Muskelarbeit und normalisierter Sauerstoffversorgung zu Kohlendioxid und Wasser oxydiert. ①

Bei starker Muskelarbeit fallen in hohem Maße die Produkte des aeroben und des anaeroben Kohlenhydratabbaus, Milchsäure, Kohlendioxid und Phosphorsäure, an. Da bei der Muskelarbeit die Durchblutung der Muskeln sich meist verschlechtert, können diese Abbauprodukte nur ungenügend abtransportiert werden. Milchsäure wird bei starker Muskelarbeit teilweise auch mit dem Schweiß abgegeben. Anhäufung von Milchsäure in Muskeln führt zu Muskelkater. Trainierte Muskeln verfügen infolge ihrer besseren Durchblutung über eine längere aerobe Arbeitsphase als untrainierte. ②

① Erläutern Sie Notwendigkeit und Herkunft der Energie für die Muskelkontraktion!

② Erklären Sie die Muskelermüdung! Begründen Sie die Rolle des Trainings für die Muskelarbeit!

③ Nennen Sie Beispiele für Krümmungsbewegungen bei Pflanzen, die Sie aus eigener Anschauung kennen! Erläutern Sie jeweils die Ursache der Bewegung!

Reizbeantwortung bei Pflanzen

Pflanzen sind durch zahlreiche Umweltfaktoren (■ Licht, Schwerkraft, Chemikalien, Temperatur, Feuchtigkeit) sowie durch Berührung und Erschütterung reizbar. Sie reagieren, wie auch die Tiere, in der Regel durch Bewegungen.

Freie Ortsbewegungen kommen nur bei einzelligen pflanzlichen Organismen vor.

Die männlichen Geschlechtszellen der Moose und Farne bewegen sich mit Hilfe von Geißeln aktiv zu den weiblichen Geschlechtszellen (↗ S. 110). Dabei reagieren sie auf chemische Reize, die von den weiblichen Geschlechtsorganen ausgehen.

Bewegungen bei höheren Pflanzen beruhen auf Änderungen des Turgordruckes (■ bei Schließzellen) oder auf Wachstumsänderungen.

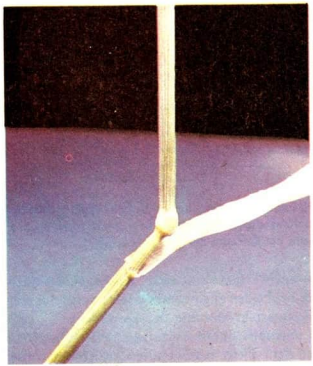
Wachstumsbewegungen. Wachstumsbewegungen äußern sich in Krümmungen von pflanzlichen Organen (■ Sproß, Wurzel, Blattranken). Durch einen einseitig wirkenden Reiz entsteht ungleiches Wachstum der gegenüberliegenden Seiten eines Organs, indem der Reiz das Wachstum der einen Seite gegenüber dem der anderen fördert.

Wachstumsbewegungen sind meist Tropismen. Tropismen sind Bewegungen, deren Richtung vom Reiz bestimmt wird.

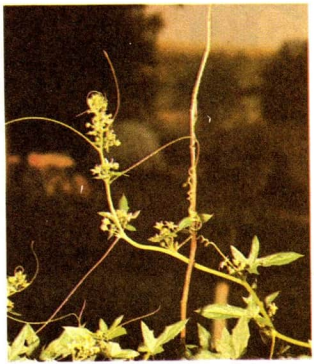
► *Wachstumsbewegungen bewirken in der Regel die räumliche Orientierung der Pflanzen entsprechend den Umwelteinflüssen.*

Bei Phototropismus wirkt das Licht als auslösender Reiz; Sproßachsen krümmen sich zum Licht hin (■ Kartoffelkeime im Keller, Sämlinge). Blätter richten sich so aus, daß ein optimaler Lichteinfall möglich ist (■ Mosaikstellung der Blätter in Buchenkronen).

Bei Geotropismus wirkt die Schwerkraft als auslösender Reiz; die Wurzeln der Pflanzen krümmen sich dem Schwerkraftreiz entgegen, Sprosse krümmen sich vom Schwerkraftreiz weg (■ Aufrichten von liegendem Getreide). ③



Liegendes, unreifes Getreide richtet sich auf, weil der Sproß an der dem Schwerkraftreiz zugewandten Seite schneller wächst



Bei Berührungsreiz wachsen die Ranken der Zaunrübe an der dem Reiz abgewandten Seite schneller

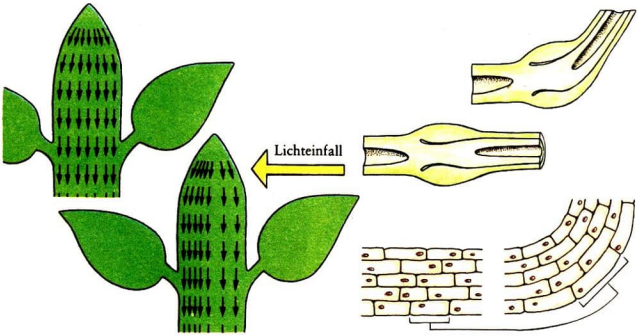
Bei Chemotropismus sind chemische Stoffe die Reize. Das gereizte Organ der Pflanze wächst in Richtung eines chemischen Gefälles (■ Pollenschläuche im Griffel, Wurzeln im Gefälle der Nährsalzkonzentration).

Wachstumsbewegungen als Reizreaktion können nur von jungen, wachstumsfähigen Pflanzenteilen ausgeführt werden. Sie dauern meist mehrere Stunden oder Tage.

Die Übertragung der durch Reize ausgelösten Erregungen zu den reaktionsfähigen Zellen oder Organteilen in den Pflanzen geschieht bei den Tropismen durch Wachstumshormone, insbesondere durch Auxin. Auxin erhöht die Dehnbarkeit der Zellwände und steuert so das Streckungswachstum der Pflanze. Es wird in der Pflanze vom Sproß in Richtung Wurzel transportiert; dabei geben alle Zellen das Auxin an ihrer der Wurzel zugekehrten Seite ab. Diese Polarisierung der Zellen gewährleistet ein gleichmäßiges Wachstum der Pflanze.

► *Tropismen beruhen auf der Änderung der Polarität der Zellen gegenüber dem Wuchsstofftransport.*

Beim Phototropismus ändert der einseitige Lichtreiz die Polarisierung der Zellen an der Sproßspitze. Die Zellen der dem Licht abgewandten Seite erhalten mehr Auxin als die der dem Licht zugewandten Seite. Diese asymmetrische Auxinverteilung entsteht in der Sproßspitze und pflanzt sich in Richtung Wurzel fort. Die Schattenseite wächst auf diese Weise schneller als die Lichtseite. Das führt zur Krümmungsbewegung in Richtung Licht.



Auxintransport in einem ungereizten und in einem durch Lichteinfall gereizten Sproß

Krümmungsbewegung im Knoten eines Getreidehalmes durch unterschiedlich starkes Zellwachstum bei Reizung durch Schwerkraft

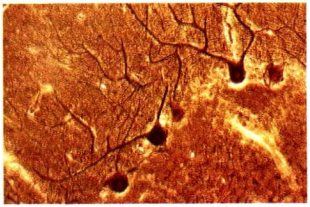
Ähnlich depolarisierend wie Lichtreize wirken auch Schwerkraftreize. Bei liegenden oder geneigten Sproßachsen wird das Auxin an der dem Erdboden zugewandten Seite angereichert; verstärktes Wachstum dieser Region führt zur Aufwärtskrümmung der Sproßachse.

In Wurzeln wird die Polarisierung der Zellen ebenfalls durch Reize geändert. Allerdings wird in Wurzelzellen der Auxintransport an der dem Licht zugewandten beziehungsweise der dem Schwerkraftreiz abgewandten Seite verstärkt.

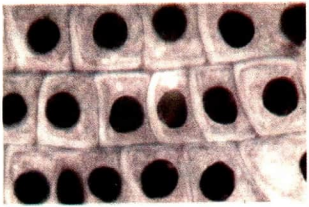
► *Der asymmetrische Auxintransport ist der Mechanismus des Signaltransports bei den Tropismen.*

Vergleichende Betrachtungen zur Reizbarkeit bei Tieren und Pflanzen

Geschmackssinnesorgane in der Zunge (250 : 1)



Nervenzellen (500 : 1)



Junge Pflanzenzellen (500 : 1)

Querschnitt durch eine Spaltöffnung mit Schließzellen (1000 : 1)

Reizbarkeit ist eine Eigenschaft der lebenden Materie. Das Protoplasma ist reizbar. Seine Reaktionsfähigkeit auf Reize zeigt sich in Änderungen seiner Bewegung. Einzellige Organismen zeigen in der Regel unabhängig von der Art des Reizes gleichartige Reaktionen.

- Amöben kontrahieren sich nach Reizung durch Berührung und nach Reizung durch chemische Stoffe.

Mit zunehmender Höherentwicklung vergrößert sich die Zahl der Reaktionsmöglichkeiten der Organismen, wenn auch die Differenzierung und Spezialisierung von Zellen zur Reizaufnahme und zur Weiterleitung von Reizen bei Pflanzen und Tieren unterschiedlich ausgebildet sind. ①②③

- Die Spitze des Keimsprosses reagiert auf Licht, die Wurzelspitze auf Schwerkraft, Fühlborsten und Blattgelenke auf Berührungsreize, Schließzellen reagieren auf Änderungen des Turgors.

① Erörtern Sie die Ausbildung von Sinnesorganen als Ausdruck der Höherentwicklung im Tierreich!

② Vergleichen Sie Reizvorgänge bei Pflanzen und Tieren! Stellen Sie Unterschiede und Gemeinsamkeiten tabellarisch zusammen!

③ Nennen Sie in Reihenfolge die einzelnen Phasen von der Reizaufnahme bis zur Reaktion!

Tiere besitzen spezielle differenzierte Sinneszellen, die durch bestimmte Reizarten besonders leicht erregt werden. Bei adäquaten Reizen reagieren sie bereits auf sehr geringe Reizenergie. Nicht adäquate Reize benötigen wesentlich höhere Energiemengen zur Reaktionsauslösung. Gruppen gleichartiger Sinneszellen sind häufig als Sinnesepithelien mit Hilfs- und Schutzeinrichtungen zu einer qualitativ höheren Einheit, einem Sinnesorgan, vereinigt.

Reize werden bei mehrzelligen Organismen in körpereigene Signale, Aktionspotentiale, transformiert. Aktionspotentiale sind Ausdruck der Erregung. Sie treten bei allen Organismen auf.

Bei vielzelligen Organismen sind die Orte der Reizaufnahme und der Reizreaktion meist getrennt, und zur Informationsübertragung sind spezielle Mechanismen im Körper ausgebildet.

Tiere verfügen dazu über spezialisierte Zellen, Nervenzellen, deren Fortsätze in Nerven gebündelt sind, die schnelle Erregungsausbreitung gewährleisten.

Pflanzen besitzen keine spezifischen Organe für die Erregungsleitung. Die Erregungen breiten sich bei Pflanzen von Zelle zu Zelle über die Leitbündel unter Mitwirkung einer Erregungssubstanz aus. Auch das Pflanzenhormon Auxin dient als Signalüberträger. Die Erregungsausbreitung geht bei Pflanzen wesentlich langsamer als bei Tieren vor sich.

Bei manchen Nervenzellen wird durch Reizung das Membranpotential vergrößert; die Zellen werden gehemmt (↗ S. 107). Das Zusammenwirken der Sinnesorgane mit erregenden und hemmenden Nervenzellen im Zentralnervensystem, zusammen mit dem Hormonsystem, gewährleistet die komplizierten Lebensfunktionen und die aktive Auseinandersetzung mit der Umwelt. ①

Besonders bei hochentwickelten Tieren ergibt sich daraus eine Vielfalt der Reaktionsmöglichkeiten und eine relative Unabhängigkeit von einzelnen Umweltfaktoren. Diese Entwicklungstendenz hat in den Leistungen des Zentralnervensystems des Menschen die höchste Stufe erreicht.

▶ Reizbarkeit ist die Fähigkeit eines Organismus, Änderungen im Energiegehalt von Umweltfaktoren als Reiz aufzunehmen und darauf zu reagieren.

Entsprechend ihrer Energieform werden chemische, optische, thermische, mechanische, osmotische und elektrische Reize unterschieden.

Die minimalste Energiemenge, durch die eine Erregung ausgelöst wird, ist der Schwellenwert, er ist bei den Sinneszellen für adäquate Reize relativ niedrig. Erregungen sind die Reizantworten des Nervensystems. Sie treten als Aktionspotentiale an der Nervenmembran auf und werden entlang den Nervenfasern fortgeleitet. Die Intensität des auslösenden Reizes ist in der mehr oder weniger dichten Folge der Aktionspotentiale verschlüsselt.

Bei Pflanzen werden Erregungen in der Regel entlang den Leitbündeln fortgeleitet.

An den Synapsen werden Erregungen durch Überträgersubstanzen von Zelle auf Zelle übertragen.

Bewegungen sind die auffälligsten Reaktionen auf Reize (■ Plasmabewegung, Muskelbewegung, Wachstumsbewegung). Die Energie für die Reaktionsabläufe wird durch Atmung und Gärung freigesetzt und in ATP oder anderen energiereichen Verbindungen gespeichert.

① Erläutern Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klasse 11 Bau und Funktion von peripherem Nervensystem und Zentralnervensystem!

Individualentwicklung

Forellenlarve

Kaulquappe der Kreuzkröte ▼

Keimpflanzen der Rot-Buche

Abgestorbene Pflanzen

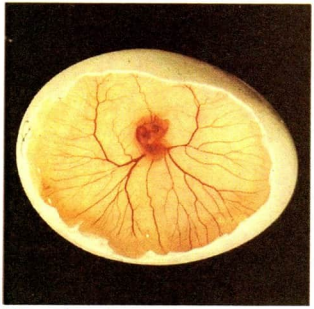
Alle mehrzelligen Organismen bestehen aus einer Vielzahl von Zellen, die sich entsprechend der stammesgeschichtlichen Entwicklungshöhe des jeweiligen Organismus durch mehr oder weniger stark ausgeprägte Differenziertheit und Spezialisiertheit unterscheiden. Aber nicht nur die stammesgeschichtliche Entwicklung wird in der Ausbildung der Zellen, Organe und Gewebe deutlich, auch in der individuellen Entwicklung, der Ontogenese, sind die aufeinanderfolgenden Phasen durch Besonderheiten im Bau, und damit zum Teil auch in den Funktionen, gekennzeichnet.

Die Ausbildung dieser einzelnen Phasen der Ontogenese steht in enger Wechselbeziehung zu den Umweltbedingungen, die auf die Organismen einwirken und auf die die Organismen im Verlauf ihrer Individualentwicklung unterschiedlich reagieren können.

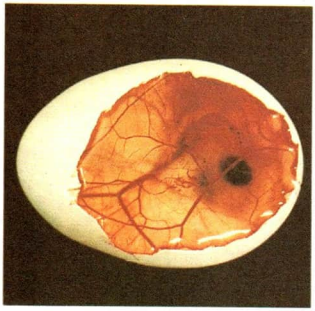
■ In auskeimenden Pflanzenteilen wird unter Lichteinwirkung Chlorophyll gebildet, in alternden Pflanzenteilen wird Chlorophyll auch bei Lichteinwirkung abgebaut (↗ S. 48).

▶ *Die Ontogenese ist die Gesamtheit der Formbildungsvorgänge von der befruchteten Eizelle über den geschlechtsreifen und fortpflanzungsfähigen Organismus und die allmähliche Rückbildung der Funktionsfähigkeit seiner Organe bis zum natürlichen Tod.*

Entwicklungsphasen mehrzelliger Tiere und des Menschen



Hühnerembryo, drei Tage alt



Hühnerembryo, zehn Tage alt

Küken nach dem Schlupf

Geschlechtsreife Hühner

▶ *Die Ontogenese verläuft in einer Folge von irreversiblen, qualitativen Veränderungen des Organismus, die für bestimmte Entwicklungsphasen typisch sind.*

Der Grad der Ausprägung und die Dauer dieser Phasen können sich bei den einzelnen Organismengruppen unterscheiden; mehr oder weniger deutlich sind aber bei allen mehrzelligen Tieren und beim Menschen die Phasen Embryonalentwicklung — Jugendentwicklung — Phase der Geschlechtsreife — Phase des Alterns, die mit dem Tod abschließt, ausgebildet.

Voraussetzung für die Entstehung und Entwicklung eines Organismus ist jeweils die Bildung der väterlichen und der mütterlichen Keimzelle. Diese „Vorstufe" des neuen Individuums liegt in der Regel zeitlich in der Phase der Geschlechtsreife der elterlichen Individuen.

Embryonalentwicklung. Die Entwicklung eines neuen Individuums beginnt mit der Embryonalentwicklung.

► *Die Embryonalentwicklung umfaßt die Befruchtung und alle weiteren Entwicklungsvorgänge bis zur Ausbildung eines selbständig lebensfähigen Individuums.* ①

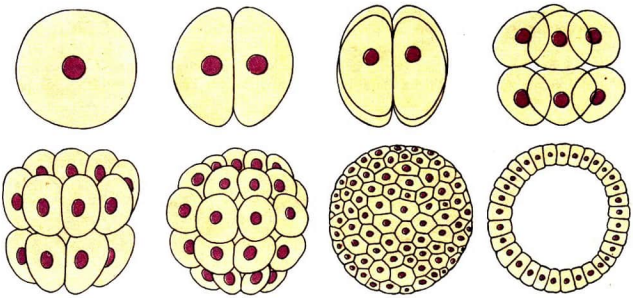
An die Befruchtung schließt sich die Furchung an, während der die befruchtete Eizelle, die Zygote, eine Reihe von mitotischen Teilungen durchläuft, die äußerlich als Furchen in der Zygote sichtbar werden. ②

Bei den Furchungsteilungen werden die einzelnen abgeschlossenen Zellteilungen nicht von Phasen des Zellwachstums unterbrochen, sondern folgen dicht aufeinander. Größe und Masse der Zygote nehmen während der Furchungsteilungen kaum zu. Die auf diese Weise entstehenden Furchungszellen, die Blastomeren, sind relativ plasmaarm. Die für die Zellen aller Lebewesen in mehr oder weniger engen Grenzen bestehende Kern-Plasma-Relation ist bei den Blastomeren stark zugunsten der Kernmasse verschoben.

Auch die gesamte Zelloberfläche wird durch die Furchungsteilungen relativ vergrößert. Beide Erscheinungen — Zunahme der Kernmasse und Oberflächenvergrößerung — sind für die Intensivierung der nachfolgenden Stoffwechselvorgänge von großer Bedeutung. ③

Nicht bei allen Tiergruppen verlaufen die Furchungsteilungen vollständig und führen zu gleichartig ausgebildeten Blastomeren.

■ Bei befruchteten Eizellen mit hohem Dottergehalt setzt die Dottermasse den mit der Teilung verbundenen Plasmabewegungen einen großen Widerstand entgegen; es erfolgt eine ungleichmäßige Furchung, bei der die Furchungszellen des dotterreichen Pols wesentlich größer sind als die des dotterarmen.



Furchungsstadien bei einem dotterarmen Ei

① Erläutern Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht der Klassen 8 und 9 den Begriff Befruchtung! Grenzen Sie ihn gegen die Begriffe Begattung und Bestäubung ab! Verwenden Sie dazu auch Bio i Ü!

② Erklären Sie den Begriff mitotische Teilung! Nutzen Sie dazu Bio i Ü!

③ Erläutern Sie die Bedeutung der Oberflächenvergrößerung bei Blastomeren im Hinblick auf die weitere Entwicklung! Beziehen Sie Ihre Kenntnisse über den Stoffwechsel der Zelle in die Erläuterung ein!

Der durch die ersten Furchungsteilungen entstehende Zellhaufen wird wegen einer gewissen Ähnlichkeit mit den Fruchtständen des Maulbeerbaumes als Maulbeerkeim oder Morula bezeichnet. Während weiterer Furchungsteilungen ordnen sich die Blastomeren in bestimmter Weise an und bilden den Blasenkeim, die Blastula, die im typischen Fall ein mit Flüssigkeit gefülltes Bläschen darstellt.

Die befruchtete Eizelle durchläuft eine Reihe mitotischer Teilungen (Furchungsteilungen) ohne Zellwachstum. Die Blastomeren (Furchungszellen) bilden zuerst eine Morula, sie ordnen sich im Verlauf der Furchung zur Blastula.

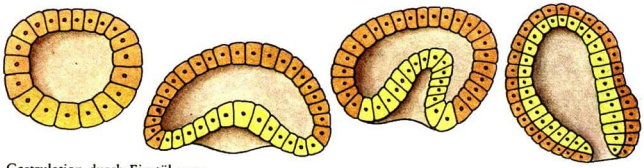
Bei den meisten Organismengruppen weisen bereits die Eizellen in ihrem Bau (■ Färbung, Anordnung des Dotters) und in der stofflichen Beschaffenheit des Plasmas Differenzierungen in einen animalen und einen vegetativen Pol auf. Diese Polarität wird auf die Entwicklungsstadien, die sich nach der Befruchtung bilden, übertragen.

Aus der Blastula entwickelt sich im Verlauf weiterer Zellteilungen der Becherkeim, die Gastrula. Auch ihre Ausbildung wird noch sehr stark von der vorhandenen Dottermenge bestimmt.

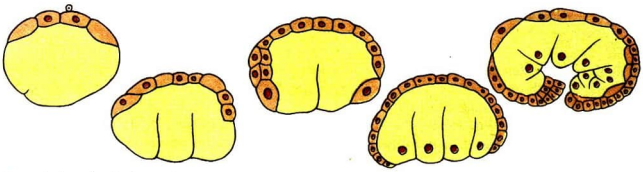
Im Anschluß an eine vollständige gleichmäßige Furchung wird die Bildung des Becherkeims (Gastrulation) in der Regel durch Einstülpung erreicht. Die Zellen des vegetativen Pols stülpen sich als geschlossene Zellschicht in die Furchungshöhle ein. Die Gastrula besteht also aus einer äußeren und aus einer inneren Zellschicht, den beiden Keimblättern Ektoderm und Entoderm.

Auf die vollständige ungleiche Furchung folgt vielfach eine Gastrulation durch Umwachsung. Die am vegetativen Pol liegenden Furchungszellen sind zu groß, um ins Innere der Blastula hineintransportiert zu werden. In vielen Fällen tritt eine typische Blastula mit innerem Hohlraum nicht auf. Daher breiten sich die kleineren Zellen des animalen Pols seitlich immer weiter aus, bis sie schließlich die großen Zellen umwachsen und damit ins Innere aufgenommen haben. Bei einigen Tiergruppen verläuft die Gastrulation noch anders.

Die im Ergebnis der Gastrulation gebildeten beiden Zellschichten stellen die beiden Keimblätter Ektoderm und Entoderm dar. Bei höherentwickelten Tierstämmen (■ Gliedertiere,



Gastrulation durch Einstülpung



Gastrulation durch Umwachsung

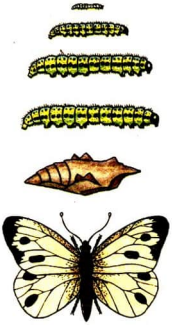
Chordatiere) bildet sich später noch ein drittes Keimblatt, das Mesoderm, dessen Ursprungszellen bei den einzelnen Organismengruppen unterschiedlicher Herkunft sind. Aus den Keimblättern differenzieren sich im Verlaufe der weiteren Embryonalentwicklung alle Organe und Organsysteme. ①②

► *Die Gastrula kann durch Einstülpung oder Umwachsung gebildet werden, sie besteht aus den beiden Keimblättern Ektoderm und Entoderm. Ektoderm, Entoderm und bei höherentwickelten Tierstämmen Mesoderm sind an der Ausbildung der Organe unterschiedlich beteiligt.*

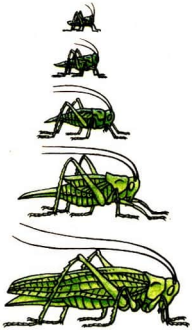
Jugendentwicklung. Der zweite Abschnitt in der ontogenetischen Entwicklung ist die Jugendentwicklung.

► *Die Jugendentwicklung umfaßt die Zeit von der Geburt oder vom Schlupf bis zum Eintritt der Geschlechtsreife.*

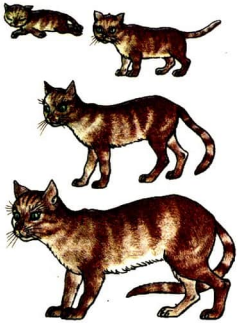
Dieser Entwicklungsabschnitt zeichnet sich durch Wachstum und fortschreitende Organausbildung, besonders der Fortpflanzungsorgane, aus. Er ist in seinem Ablauf bei den verschiedenen Tiergruppen sehr unterschiedlich und verläuft als direkte oder als indirekte Entwicklung. Bei der direkten Entwicklung stimmt das Jungtier in seinem Bau im wesentlichen bereits mit dem erwachsenen Tier überein. Bei der indirekten Entwicklung treten Larvenformen auf, die sich vom geschlechtsreifen Tier in der Gestalt und im Stoffwechsel mehr oder weniger stark unterscheiden. Die Umwandlung von der Larve in das geschlechtsreife Tier ist die Metamorphose. ③



Indirekte Entwicklung mit vollständiger Verwandlung (■ Kohlweißling)



Indirekte Entwicklung mit unvollständiger Verwandlung (■ Heuschrecke)



Direkte Entwicklung (■ Katze)

① Vergleichen Sie das durch Einstülpung entstandene Gastrulastadium eines Wirbeltieres mit einem Hohltier (■ Süßwasserpolyp)! Schließen Sie, aus welchen Keimblättern wesentliche Teile des Nervensystems und des Verdauungssystems entstehen werden!

② Kennzeichnen Sie den Zeitraum der Embryonalentwicklung!

③ Erläutern Sie, welchem Entwicklungstyp die Jugendentwicklung des Wasserfrosches entspricht!

Die selbständige Lebensfähigkeit gilt in der Regel als Beginn der Jugendentwicklung; sie ist nicht bei allen Arten nach Abschluß der Embryonalentwicklung uneingeschränkt erreicht. Besonders innerhalb der Vögel und Säugetiere gibt es Arten, bei denen die Entwicklung der Jungtiere auch nach dem Schlupf beziehungsweise nach der Geburt nicht so weit abgeschlossen ist, daß sie zur selbständigen Auseinandersetzung mit der Umwelt fähig sind (■ unvollkommene Ausbildung der Wärmeregulation und der Sinnesorgane). ①

Phase der Geschlechtsreife. Mit der vollständigen Ausbildung der Geschlechtsorgane und der Reifung der Geschlechtszellen beginnt die Reifephase in der ontogenetischen Entwicklung. Mit Beginn dieser Phase ist in der Regel das Größenwachstum der Individuen abgeschlossen.

▶ *Die biologische Bedeutung der Reifephase liegt in der Erzeugung von Nachkommen.*

Besonders bei Tieren mit hohen Nachkommensraten ist die Reifephase sehr kurz; viele Arten (■ Eintagsfliegen) sterben unmittelbar im Anschluß an die Fortpflanzung; bei anderen Organismen kann die Reifephase den Zeitraum mehrerer Jahre umfassen (■ Mensch).

Alternsphase und Tod. Zellen sind nur in zeitlich begrenztem Umfang lebensfähig; bei alternden Zellen sinkt der Wassergehalt des Plasmas, die Stoffwechselprozesse verlangsamen sich oder fallen ganz aus, bis schließlich die Zelle abstirbt.

Solche Prozesse des Alterns sind bereits in der Reifephase der Organismen und sogar während der Jugendentwicklung nachweisbar (■ Hautzellen, Haare). In diesen Phasen können alternde Zellen aber meist ersetzt werden (■ durch Differenzierung von Bildungszellen).

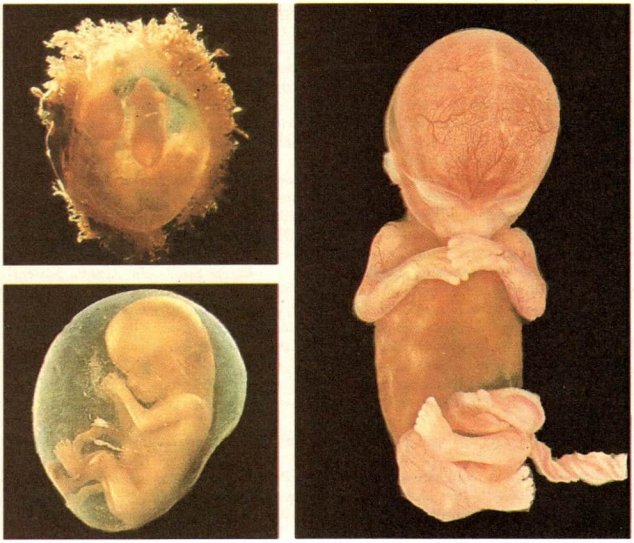
▶ *Im Verlaufe der Alternsphase nimmt die Regenerationsfähigkeit der Gewebe in der Regel ab, und alternde Zellen werden nicht ersetzt.*

Die Funktionstüchtigkeit vieler Gewebe und Organe ist eingeschränkt, die Anpassungsfähigkeit des Organismus an wechselnde Umweltbedingungen läßt nach, der Ablauf der Stoffwechselprozesse wird so eingeschränkt, daß nicht genügend Stoffe und Energie für die Aufrechterhaltung der Lebensprozesse zur Verfügung stehen. Die Alternsphase schließt bei Ausfall wichtiger Lebensfunktionen mit dem Tode ab.

▶ Die Individualentwicklung eines Organismus beginnt mit der Befruchtung der Eizelle und verläuft über eine charakteristische Folge von Entwicklungsphasen bis zum Tod. Die einzelnen Phasen sind durch qualitative Veränderungen gekennzeichnet, die dabei ablaufenden Prozesse sind irreversibel.

① Nennen Sie Beispiele für Nesthocker und Nestflüchter unter den Säugetieren! Begründen Sie Ihre Aussage durch Vergleich des Entwicklungsgrades der Neugeborenen!

Ontogenese des Menschen



Unterschiedliche Entwicklungszustände menschlicher Keimlinge

Die Ontogenese des Menschen beginnt ebenso wie die aller mehrzelligen Tiere mit der Befruchtung der Eizelle und verläuft über mehrere Entwicklungsphasen. Während der Ontogenese werden auch die Geschlechtszellen gebildet, die die Voraussetzung für die Entstehung eines neuen Individuums sind. Die Entwicklung von männlichen Keimzellen, Spermien, beginnt mit der Pubertät und endet oft erst während der Alternsphase des Mannes. Die Entwicklung der Eizellen beginnt bereits während der Embryonalentwicklung und tritt kurz nach der Geburt in eine vorübergehende Ruhephase ein. Mit Beginn der Pubertät setzt die weitere Entwicklung ein, die in periodisch wiederkehrenden Abständen (Menstruationszyklus) jeweils zur Reifung einer Eizelle in einem der beiden Eierstöcke führt.

Die Eizelle ist im Eierstock in einem Follikel eingeschlossen; bei der Reifung der Eizelle platzt der Follikel, und die Eizelle wird ausgestoßen. Dieser Vorgang ist die Ovulation.

Das Ei wird durch die Bewegungen des Flimmerepithels im Eileiter zur Gebärmutter transportiert. Noch im Eileiter muß das Ei befruchtet werden, da es unbefruchtet nur wenige Stunden lang lebensfähig ist.

Die Spermien gelangen bei der Begattung in die Scheide und von dort durch Eigenbewegung in den Eileiter.

Die aktive Vorwärtsbewegung der Spermien erfolgt mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 µm bis 60 µm in der Sekunde. Bezogen auf die eigene Länge (50 µm bis 70 µm) erreichen sie somit eine Geschwindigkeit, die dem Marschtempo beziehungsweise Schwimmweltrekord beim Menschen entspricht.

Auf diesem Weg von etwa 16 cm bis 20 cm Länge geht ein großer Teil der Spermien zugrunde; die restlichen Spermien haben eine Lebensdauer von etwa 2 bis 3 Tagen.

Im Eileiter können ein oder mehrere Spermien durch die Eihülle hindurch in das Ei eindringen, wobei sich das Ei an der Stelle des Eindringens zum Empfängnishügel vorwölbt.

Unter dem Einfluß bestimmter, von den eingedrungenen Spermien abgegebener Befruchtungsstoffe vollzieht sich im Ei die zweite meiotische Teilung (↗ S. 155), so daß das Ei erst in diesem Stadium befruchtungsfähig wird.

In der Regel gelangt nur eines der eingedrungenen Spermien zur Befruchtung.

Der im wesentlichen aus Kernsubstanz bestehende Spermienkopf schwillt durch Aufnahme von Flüssigkeit aus dem ihn nun umgebenden Zellplasma der Eizelle zu einem rundlichen Kern von etwa gleicher Form und Größe wie der Eikern an. Beide Kerne legen sich nebeneinander und verschmelzen zum Zygotenkern.

Durch die Kernverschmelzung erhält die damit befruchtete Eizelle, die Zygote, den entscheidenden Entwicklungsimpuls, sie beginnt sich zu teilen.

▶ *Mit der Zygotenteilung beginnt die Entwicklung des neuen Individuums.*

Sowohl die Entwicklung des Eies bis zur Ovulation als auch die nachfolgenden Phasen der Befruchtung und Embryoentwicklung werden in ihrem Ablauf durch zahlreiche zum Teil antagonistisch wirkende Hormone gesteuert.

■ Das Progesteron wird besonders nach einer vollzogenen Befruchtung wirksam, es hemmt unter anderem die Ovulation und verhindert so weitere Befruchtungen während der Schwangerschaft.

Synthetisch hergestellte Progesteronverbindungen werden als empfängnisverhütende Mittel eingesetzt.

Durch die relativ kurze Lebensdauer der Keimzellen ist die Möglichkeit der Befruchtung auf einen sehr kurzen Zeitraum beschränkt. Spermien können aber im gefrosteten Zustand längere Zeit lebensfähig bleiben. Die Nutzung dieser Möglichkeit im humanbiologischen Bereich ist abhängig von der herrschenden Gesellschaftsordnung und deren Einstellung zur Würde des Menschen.

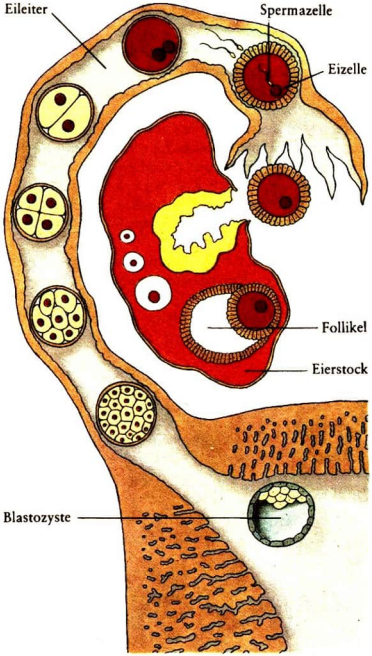
■ Auf diese Weise kann Ehepaaren, bei denen der männliche Partner zeugungsunfähig ist, die Möglichkeit zur Erfüllung eigener Kinderwünsche gegeben werden. Voraussetzung für einen solchen Eingriff sollte der übereinstimmende Wunsch beider Ehepartner nach einem Kind sowie die Anonymität des Spermaspenders sein.

■ Unter kapitalistischen Verhältnissen können zum Teil wirtschaftliche Interessen bei der Nutzung dieser Möglichkeiten zum Tragen kommen (■ Reklame für Kliniken durch die Gewinnung berühmter Männer als Spermaspender). ①

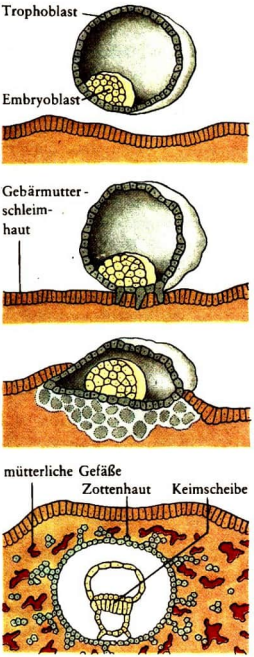
Embryonalentwicklung. Die befruchtete Eizelle gelangt durch Bewegungen des Flimmerepithels und durch Kontraktionen der Eileiterwand in die Gebärmutterhöhle. Während dieser Zeit erfolgt bereits die Furchung, in derem Verlauf zahlreiche gleichgroße Blastomeren entstehen, die von der Eihülle umschlossen sind. ②

① Werten Sie die Möglichkeiten, die der Einsatz von Spermaspendern in der Humanbiologie haben kann!

② Schließen Sie aus dem Furchungstyp auf den Dotteranteil der menschlichen Eizelle! Setzen Sie die Größe des Dotteranteils zu dem Ort der Keimlingsentwicklung in Beziehung!



Ovulation, Befruchtung und erste Furchungsteilungen



Einbettung der Blastozyste in die Gebärmutter

Etwa vier bis sechs Tage nach der Befruchtung hat der Keimling die Gebärmutterhöhle erreicht. Aus der Morula hat sich inzwischen die äußerlich einer Blastula ähnliche Blastozyste entwickelt, die Eihülle wird aufgelöst.

▶ *Die Blastozyste besteht aus dem Trophoblasten und dem Embryoblasten.*

Die Differenzierung in die unterschiedlichen Zellkomplexe setzt bereits im Morulastadium ein.

Der Trophoblast besteht aus einer Schicht kleinerer Zellen, die den Hohlraum der Blastozyste begrenzt; der Embryoblast besteht aus einem kompakten Komplex größerer Zellen, der in den Hohlraum der Blastozyste hineinragt.

Die Zellen des Trophoblasten bilden die Fruchthüllen und Anhangsorgane (■ Zottenhaut, Verbindung zum Gebärmuttergewebe), während sich der Keimling nur aus den Zellen des Embryoblasten entwickelt.

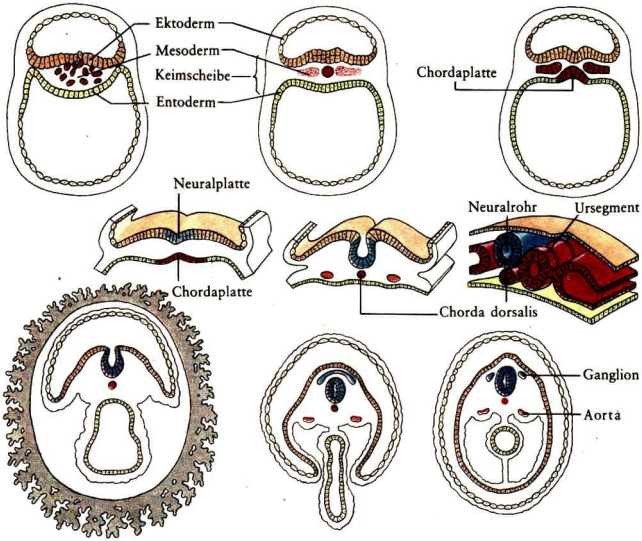
Aus der befruchteten Eizelle des Menschen entwickeln sich sowohl der Keimling als auch dessen Fruchthüllen.

Berührt die Blastozyste die Schleimhaut der Gebärmutterhöhle, bilden die Zellen des Trophoblasten an der Berührungsstelle rasch ein mehrschichtiges Gewebe, das in die Schleimhaut eindringt; dabei werden durch eiweißspaltende Enzyme, die von den Zellen des Trophoblasten abgegeben werden, die Zellen der Schleimhaut teilweise zerstört.

Die Zellen des Embryoblasten differenzieren sich in zwei deutlich unterscheidbare Schichten, das Ektoderm und das Entoderm, aus denen sich die Keimscheibe und im Verlaufe der weiteren Entwicklung der Keimling bilden. Zunächst entsteht aus Zellen des Ektoderms, die zwischen die beiden ersten Keimblätter einwandern, ein drittes Keimblatt, das Mesoderm.

Durch weitere Zellverlagerungen im Verlaufe unterschiedlich rascher Teilungs- und Wachstumsvorgänge sowie durch Zelldifferenzierungen bilden sich aus den Keimblättern die Anlagen der späteren Organe heraus.

- Der mittlere Abschnitt des Ektoderms verdickt sich zur Neuralplatte, deren Ränder zum Neuralrohr verwachsen. Damit ist die erste Anlage des Nervensystems gegeben.
- Aus dem Entoderm entstehen Teile des Verdauungssystems.
- Zellen des Mesoderms bilden die Chordaplatte, die ins Entoderm einwächst und die Chorda dorsalis bildet. ①

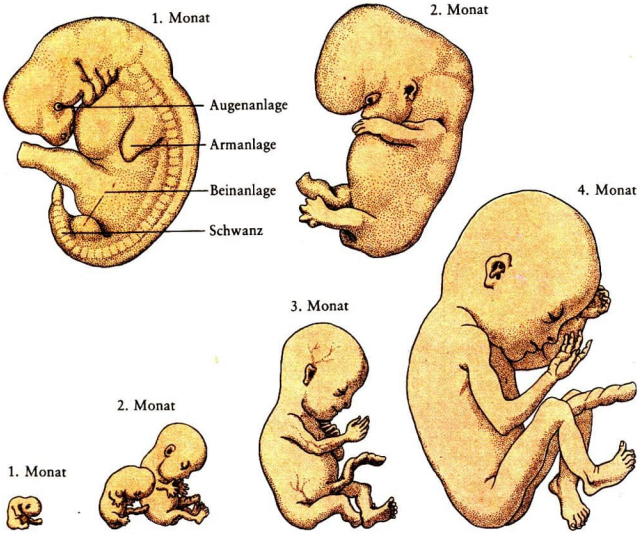


Unterschiedliche Stadien bei der Bildung und Differenzierung der Keimblätter

■ Aus Teilen des Mesoderms bilden sich durch unterschiedlich starkes Wachstum und Verlagerung von Zellen mehrere Ursegmente heraus, die die Anlagen für bestimmte Organsysteme (■ Lederhaut, Muskelsystem, Wirbelsäule) bilden.

In der vierten bis fünften Woche sind die wesentlichen Merkmale des Wirbeltierkörpers ausgebildet, durch bestimmte Differenzierungen (■ Augenlage) ist der Keimling bereits als menschlicher Embryo zu erkennen.

Im zweiten Monat der Keimesentwicklung beginnt eine starke Größenzunahme, wobei sich der Kopfteil mit der Gehirnanlage zuerst wesentlich schneller als die anderen Teile entwickelt. In der 12. Woche ist die menschliche Gestalt bereits deutlich zu erkennen, der Schwanz ist rückgebildet, die Gliedmaßen sind ausgebildet, Finger- und Zehennägel angelegt, männliche beziehungsweise weibliche Geschlechtsmerkmale entstehen. Etwa in der 16. Woche ist der Keimling rund 16 cm groß, die Skelettmuskulatur ist so weit ausgebildet, daß Bewegungen von der Mutter gespürt werden, auch die Herztöne sind von dieser Zeit an hörbar. ②



Äußere Gestalt verschieden alter menschlicher Keimlinge

① Ziehen Sie aus dem Auftreten einer Chorda dorsalis Schlußfolgerungen auf die Stellung des Menschen im natürlichen System!

② Erläutern Sie die Embryonalentwicklung des Menschen als Übergang von quantitativen Veränderungen in qualitative Veränderungen!

Während der gesamten Embryonalentwicklung bleibt der menschliche Keimling über die vom Trophoblasten gebildete Zottenhaut mit der Plazenta (Mutterkuchen) des mütterlichen Uterus verbunden (↗ Abb. S. 127). In einem komplizierten System von Zotten und Spalten bleiben die Gefäße der Mutter und des sich entwickelnden Kindes voneinander getrennt, liegen aber so dicht aneinander, daß ein Austausch von Stoffen durch die Gefäßwände hindurch möglich ist. Dabei werden sowohl Atemgase als auch Nährstoffe, Vitamine und Abbauprodukte ausgetauscht. ①

► *Der Keimling ist über die Gefäße der Zottenhaut und der Plazenta mit dem mütterlichen Stoffwechsel verbunden. Er erhält auf diesem Wege Sauerstoff, Nährstoffe, Mineralsalze, Wirkstoffe. Er gibt Kohlendioxid und Abbauprodukte ab.*

Auch Gift- oder Wirkstoffe (■ durch den Genuß von Kaffee, Tabak und anderen Genußmitteln oder durch unkontrollierte Einnahme von Medikamenten) gelangen über die Mutter in den Embryo und können die Entwicklung des Keimes hemmen oder schädigen. Dabei werden in der Regel besonders die Körperteile oder Organe (■ Extremitäten, Sinnesorgane), die zur Zeit der Beeinflussung eine besonders intensive Entwicklung durchlaufen, geschädigt.

■ Eine Infektion mit Rötelviren während der ersten 5 Wochen der Schwangerschaft führt in über 50 % der Fälle zum Absterben des Keimlings oder zu schweren Mißbildungen, vor allem des Herzens; eine Infektion während der 5. bis 8. Woche verursacht vor allem Störungen am Auge; eine Infektion während der 7. bis 12. Woche kann die Ursache von Ohrschädigungen (■ Taubheit, Gleichgewichtsstörungen) sein.

Insgesamt gelten besonders die ersten Monate der Embryonalentwicklung als empfindliche Phasen.

Kinder von stark rauchenden Müttern sind in ihrer Embryonalentwicklung eindeutig benachteiligt. Ein relativ großer Anteil der Keime stirbt während der ersten Entwicklungsphasen ab; geburtsreife Kinder zeigen häufiger Anomalien und sind vielfach untergewichtig oder unterentwickelt. ②

■ Schädigungen der Keimlinge durch Wirkstoffe von Medikamenten traten 1961 gehäuft in der BRD auf; zahlreiche Kinder, deren Mütter in den ersten Monaten der Schwangerschaft das Beruhigungsmittel „Contergan" genommen hatten, wurden mit Störungen in der Ausbildung der Gliedmaßen (■ Ansatz der Hände und Füße nahe dem Rumpf) geboren.

Auch während der Stillzeit wirken Genußmittel und Medikamente über die Mutter auf das Kind ein und beeinflussen seine Entwicklung negativ.

Viele äußere Faktoren (■ Röntgenstrahlen) wirken auf Organismen im Embryonalzustand besonders stark, da durch die vielfältigen Entwicklungsprozesse Stoffwechsel und Formbildung relativ labil sind.

■ In der DDR werden werdende Mütter nach Möglichkeit nicht röntgenologisch untersucht, um eventuelle Strahlenschäden des Keimlings zu vermeiden.

Spätwirkungen von Strahlenschäden treten jetzt noch in Japan bei Kindern auf, deren Mütter zur Zeit des Atombombenabwurfs über Nagasaki und Hiroshima als Embryonen der Strahlung ausgesetzt waren und dabei Schädigungen der Keimzellenanlagen erlitten.

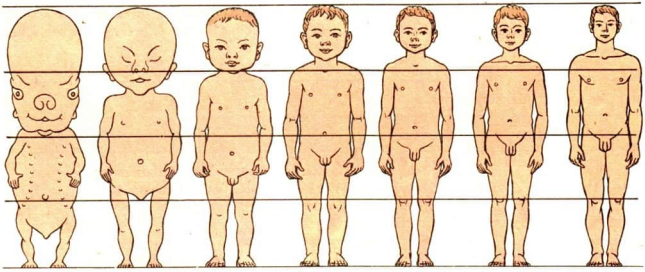
► *Der Keimling kann durch Giftstoffe und Krankheitserreger aus dem mütterlichen Organismus geschädigt werden.*

① Stellen Sie die Verbindung zwischen mütterlichem und embryonalem Kreislaufsystem in einer Schemazeichnung dar!

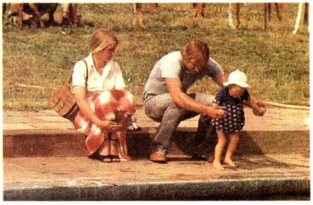
② Begründen Sie anhand Ihrer Kenntnisse über die Wirkung von Nikotin die Tatsache, daß die Kinder von Müttern, die in der Schwangerschaft stark rauchten, im statistischen Mittel in ihrer Entwicklung beeinträchtigt sind!

Nachgeburtliche Entwicklung. Auch die nachgeburtliche Entwicklung ist mit Größen- und Masseveränderungen sowie mit Differenzierung und Spezialisierung von Zellen, Organen oder Organsystemen verbunden. Sie wird von zahlreichen inneren Faktoren (■ Ernährung) beeinflußt.

► *Die ersten Phasen der nachgeburtlichen Entwicklung sind äußerlich besonders durch die Veränderung der Körperproportionen charakterisiert.*



Änderung der Körperproportionen im Verlaufe der Entwicklung



Aneignung körperlicher Fähigkeiten (■ zunehmende Beherrschung des Bewegungsapparates beim Säugling, Kleinkind und Jugendlichen) und Aneignung geistiger Fähigkeiten (■ beim Spiel)

Neben der körperlichen Entwicklung (■ aktive Beherrschung des Bewegungsapparates, Erreichung der endgültigen Körpergröße, Ausbildung des bleibenden Gebisses, Ausbildung der sekundären Geschlechtsmerkmale) tritt im Verlaufe der nachgeburtlichen Entwicklung immer stärker die Ausbildung der gesellschaftlichen Merkmale des Menschen in den Vordergrund. Dazu gehören die Beherrschung und Nutzung der Kommunikationsmittel Sprache und Schrift, die Aneignung des gesellschaftlichen Wissens und gesellschaftlicher Erfahrungen, bewußtes Einordnen in Kollektive, Schaffung geistiger und materieller Werte für die Gesellschaft. Diese Entwicklung kann bis weit in die Alternsphase hineinreichen, in der die biologischen Strukturen des Menschen — Zellen, Gewebe, Organe — bereits Abbauerscheinungen aufweisen.

■

Phasen nachgeburtlicher Entwicklung	
Entwicklungsabschnitte	**Merkmale**
Säuglingsalter 0 bis 1 Jahr	■ Schnellste nachgeburtliche Längen- und Massezunahme; zunehmend aktive Beherrschung des Bewegungssystems (■ Aufrichten, Laufen); erste Wortnachahmungen
Kindesalter 1 bis 13 Jahre	■ Schnelles körperliches Wachstum; Veränderung der Körperproportionen, bewußter Gebrauch der Sprache, erstes Einordnen in gesellschaftliche Kollektive, Erwerb der Grundlagen der Allgemeinbildung
Jugendalter 13 bis 18 Jahre	■ Abschluß des Längenwachstums; Ausbildung der sekundären Geschlechtsmerkmale, Eintritt der Geschlechtsreife; Beginn der Berufsausbildung; Beginn selbständiger gesellschaftlicher Tätigkeit, Gewinnung der gesellschaftlichen Reife, bewußtes Gestalten der Kommunikation mit der Umwelt
Leistungsalter ab 18 Jahren	■ Volle Entfaltung der körperlichen und geistigen Kräfte; bewußter Einsatz der Persönlichkeit zur Schaffung materieller und geistiger Werte; Familienplanung und -gründung, Zeugung von Nachkommen; Übernahme der Verantwortung für die allseitige gesunde Entwicklung der Kinder; Weitergabe von Wissen und Können an die nachfolgende Generation
Rückbildungs- und Greisenalter	■ Nachlassen der körperlichen Leistungsfähigkeit (■ Beweglichkeit, Leistungen der Sinnesorgane), wird durch Lebenserfahrung teilweise ausgeglichen; Nachlassen der Anpassungs- und Widerstandsfähigkeit; Nachlassen der Fortpflanzungsfunktionen
Tod	Ausfall lebenswichtiger Organe durch altersbedingten Funktionsabfall oder Krankheiten

Zu den biologischen Abbauerscheinungen, die die Phase des Alterns bestimmen, gehören vielfältige morphologische und physiologische Veränderungen.

Durch den Abbau von Zellen, für die keine Ersatzzellen mehr gebildet werden, verlieren viele Organe (■ Leber, Nieren, Skelettmuskulatur) an Gewebemasse, sie atrophieren.

Der Wassergehalt des Zellplasmas verringert sich; die Stoffwechselprozesse laufen langsamer ab; die Fähigkeit zur Sekretion und Resorption in den Zellen der Schleimhäute von Magen und Darm nimmt ab.

Im Zusammenhang mit diesen Veränderungen sinkt mit zunehmendem Alter die körperliche und in der Regel die psychische Leistungsfähigkeit. In der beruflichen Leistung allerdings kann dieses Absinken oft noch längere Zeit durch zunehmende Erfahrung und zweckmäßigere Gestaltung des Arbeitsvorganges kompensiert werden.

Auf Zeitpunkt und Ausmaß der Alternsveränderungen kann durch staatliche und gesellschaftliche Maßnahmen, ganz wesentlich aber auch durch eigene Bemühungen, weitgehend Einfluß genommen werden. ①

■ Kontinuierliches körperliches und geistiges Training von Kindheit an, eine gesunde Lebensführung, ausreichende Ruhephasen und optimale Ernährung können den Alternsprozeß verzögern. Von großer Bedeutung für die Lebenserhaltung im höheren Alter ist, ob dem jeweiligen Zustand angepaßte Aufgaben dem Alternden das Gefühl geben, für die Familie und für die Gesellschaft von Nutzen zu sein. Derartige Arbeits- und Lebensbedingungen für jeden Menschen zu schaffen ist zentrales Anliegen der sozialistischen Staaten. Die Ergebnisse der von ihnen mit hohen finanziellen Aufwendungen betriebenen umfassenden wissenschaftlichen Untersuchungen der Alternsprozesse werden die weitere Verlängerung der Lebenszeit ermöglichen.

In der DDR ist durch zahlreiche sozialpolitische Maßnahmen sowie durch Anwendung wissenschaftlicher Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsrichtungen (■ Medizin, Ernährungsphysiologie, Gerontologie) eine beachtliche Erhöhung der durchschnittlichen Lebenserwartung erreicht worden. ②③

■ Durch umfassende Beratung und Betreuung werdender Mütter, durch die Entbindung in Kliniken unter ärztlicher Kontrolle, durch die Gewährung des Schwangeren- und Wochenurlaubs, durch die teilbezahlte Arbeitsfreistellung der Mütter während der ersten 12 Lebensmonate des zweiten und der folgenden Kinder wurden die Belastungen für werdende und stillende Mütter eingeschränkt sowie für die gesunde Entwicklung der Kinder während der ersten, besonders gefährdeten Monate gute Voraussetzungen geschaffen.

■ Schwangerenberatungen, Impfungen, prophylaktische Reihenuntersuchungen schaffen gute Grundlagen zur Gesunderhaltung des Menschen von der Embryonalentwicklung bis ins Alter.

■ Durch die Arbeitsgesetzgebung werden jedem Bürger die zur Erhaltung und Regeneration seiner körperlichen und psychischen Leistungsfähigkeit notwendigen Bedingungen (■ Bedingungen am Arbeitsplatz, Freizeit) gewährleistet.

■ Ärztliche Betreuung, altersgemäße gesunde Ernährung, zahlreiche Anregungen für körperliche und geistige Beschäftigungen helfen älteren Bürgern in Alters- und Pflegeheimen sowie in Wohnheimen für ältere Bürger, ihre physische und psychische Leistungsfähigkeit optimal zu nutzen und zu erhalten.

① Nennen Sie individuelle Möglichkeiten zur Schaffung optimaler Bedingungen für die nachgeburtliche Individualentwicklung!

② Stellen Sie den Altersaufbau der Bevölkerung in der DDR von 1979 graphisch dar! Entnehmen Sie die Angaben dazu dem Statistischen Jahrbuch der DDR 1980!

③ Stellen Sie mit Hilfe des Statistischen Jahrbuches der DDR fest, um wieviel Prozent die Säuglingssterblichkeit im Zeitraum von 1970 bis 1980 gesunken ist!

Betreuung älterer Bürger durch Veteranenklubs der Volkssolidarität

Die Ontogenese des Menschen verläuft wie die Individualentwicklung anderer mehrzelliger Tiere in mehreren Phasen, die sich durch qualitative, irreversible Veränderungen auszeichnen.

Voraussetzung ist die Befruchtung des Eies innerhalb weniger Stunden nach der Ovulation. Aus der Morula entwickelt sich die in Trophoblast und Embryoblast differenzierte Blastozyste, die sich in der Schleimhaut der Gebärmutter einnistet. Aus dem Trophoblasten entstehen Fruchthüllen und Anhangsorgane, aus dem Embryoblasten entsteht über die Bildung der Keimscheibe und der Keimblätter der Embryo.

Etwa vier Wochen nach der Befruchtung sind die wesentlichen Körpermerkmale angelegt. Während der Embryonalentwicklung bleibt der Keimling mit dem mütterlichen Stoffwechsel verbunden und kann so Sauerstoff und Nährstoffe, aber auch Schadstoffe über die Mutter aufnehmen sowie Abbauprodukte aus dem eigenen Stoffwechsel abgeben.

In der nachgeburtlichen Entwicklung tritt neben der körperlichen Entwicklung bis zur Ausbildung der Reifephase immer stärker die Entwicklung der gesellschaftlichen Merkmale des Menschen in den Vordergrund.

Die Alternsphase wird durch den Verlust der Regenerationsfähigkeit vieler Zellen und die Verlangsamung der Stoffwechselabläufe gekennzeichnet, die schließlich zum Ausfall lebenswichtiger Organe führen.

Die Ontogenese wird vom Einwirken innerer und äußerer Faktoren bedingt, sie kann durch gesellschaftliche und individuelle Maßnahmen und Verhaltensweisen beeinflußt werden.

Genetik

Genetische Experimente an Schlaf-Mohn

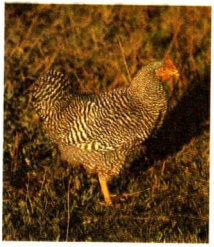
Die Genetik oder Vererbungslehre befaßt sich mit allen Vorgängen, die Übereinstimmungen in strukturellen Kennzeichen, Eigenschaften und Funktionen der Organismen bedingen, welche unmittelbar oder mittelbar voneinander abstammen beziehungsweise über Zwischenglieder miteinander verwandt sind. Sie untersucht Ursachen, die die prinzipielle Einheitlichkeit vieler Erscheinungen im Bereich der lebenden Natur (■ Aufbau aus Zellen, Entwicklung, Reizbarkeit) ermöglichen. Forschungsgegenstand der Genetik sind aber auch die Prozesse, die verändernd auf die Merkmale einwirken und die Vielfalt der Organismen (■ morphologische und physiologische Angepaßtheiten an unterschiedliche Lebensräume, an unterschiedliche Ernährungsweisen) begründen.

Der Begriff Genetik wurde 1907 von dem englischen Biologen William BATESON (1861 bis 1926) geprägt und leitet sich von *genesis* (Werden) ab.

Ursache der Merkmalsübereinstimmung bei miteinander verwandten Lebewesen ist das Vorhandensein gleicher Erbanlagen bei ihnen. Die Übertragung von Erbanlagen auf die Nachkommenschaft bei der geschlechtlichen oder ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist die Vererbung.

Die Gesamtheit der Erbanlagen eines Organismus ist seine genetische Information; sie ist in spezifisch strukturierten Zellbestandteilen, den genetischen Informationsträgern (Erbträger, genetisches Material), lokalisiert. Genetische Informationsträger sind bei allen Lebewesen Nukleinsäuremoleküle, die sich bei Kernlosen (■ Bakterien, Blaualgen) im Zellplasma befinden, während sie bei allen anderen Organismen, auch dem Menschen, in Zellkern und Mitochondrien, bei Pflanzen auch in Plastiden enthalten sind. Durch die im Zellkern lokalisierten Erbanlagen sind bei diesen Organismen fast alle Merkmale bedingt; die wenigen in anderen Zellorganellen enthaltenen Erbanlagen sind für die Merkmalsausbildung von untergeordneter Bedeutung.

Relative Konstanz und Variabilität



Unterschiedliche Hühnerrassen

Aus dem Samen einer Rapspflanze entstehen wieder Rapspflanzen, aus Hühnereiern schlüpfen immer nur Hühnerkücken, aus der Vereinigung einer menschlichen Ei- und einer menschlichen Samenzelle geht wiederum ein Mensch hervor. Die Nachkommen stimmen zumindest in den Merkmalen, die die jeweilige Art (■ Raps, Haushuhn, Mensch) kennzeichnen, mit ihren Eltern überein. Die Ausbildung dieser Artmerkmale ist in der Regel über viele Generationen, zum Teil über Jahrmillionen hinweg, gleich. Die Artmerkmale stellen jeweils einen Komplex unterschiedlich vieler spezifischer Bau- und Funktionsmerkmale dar, durch den sich Organismen als zu einer bestimmten Art zugehörig ausweisen beziehungsweise von Organismen anderer Arten unterscheiden. Nur Individuen mit gleichen Artmerkmalen ist in der Regel die geschlechtliche Fortpflanzung mit Erzeugung fruchtbarer Nachkommen möglich. ①②③

► *Eine Art bilden alle, auch zu verschiedenen Zeiten lebenden Organismen, die einen Komplex genetisch bedingter Merkmale aufweisen, durch den sie sich von anderen Lebewesen unterscheiden, und die unter natürlichen Bedingungen miteinander fruchtbare Nachkommen hervorbringen könnten.*

Die Ausbildung der Artmerkmale ist durch bestimmte Erbanlagen bedingt, die über ungeschlechtliche und geschlechtliche Fortpflanzung von Generation zu Generation relativ unverändert weitergegeben werden. Vererbt werden also nicht Merkmale, sondern Informationen für deren spätere Ausbildung. Diese Informationen regeln in jedem neuentstehenden Organismus die Synthese artspezifischer Enzyme und anderer arttypischer Eiweiße. Die artspezifischen Eiweiße sind damit selbst als Artmerkmale zu bezeichnen oder als Grundlage der die Art kennzeichnenden Merkmale zu verstehen. ④

► *Arten sind in artspezifischen Merkmalen über Generationen hinweg relativ konstant. Ursache dieser relativen Konstanz jeder Art sind bestimmte, weitgehend unverändert an die Nachkommen weitergegebene Erbanlagen.*

Angehörige einer Art stimmen vor allem in den artspezifischen Merkmalen weitgehend überein, in vielen anderen Merkmalen jedoch unterscheiden sie sich mehr oder weniger deutlich voneinander. So gleicht keine Rapspflanze völlig der anderen. Haushühner sind in Aussehen und Leistung verschieden. Kein Mensch hat unter den etwa vier Milliarden Menschen auf der Erde einen ihm in allen Merkmalen gleichenden Doppelgänger, selbst Geschwister — sogar eineiige (monozygotische) Zwillinge — sind einander nur ähnlich und nie völlig gleich. ⑤

Die Unterschiede zwischen Angehörigen einer Art sind jedoch in der Regel weitaus geringer als die zwischen Organismen verschiedener Arten, so daß beispielsweise ein Mensch trotz aller Besonderheiten immer als Mensch erkennbar ist.

▶ *Angehörige einer Art unterscheiden sich voneinander. Ursache dieser Variabilität in der Merkmalsausprägung sind Modifikationen und Mutationen.*

Unter identischen Umweltbedingungen bilden alle Organismen, die für ein bestimmtes Merkmal die gleiche Erbanlage haben, dieses Merkmal in gleicher Form aus. Bei einem Individuum mit ebenfalls der gleichen Erbanlage, das in anderer Umwelt lebt, kann das Merkmal verändert ausgebildet sein. Solche Veränderungen sind Modifikationen. Sie werden durch das Einwirken bestimmter Umweltfaktoren (■ Nahrung, Luft, Temperatur, Licht) auf die Merkmalsausbildung hervorgerufen, ohne daß diese Faktoren Einfluß auf die Erbanlage selbst nehmen. Bei Menschen können auch gesellschaftliche Faktoren verändernd auf die Merkmalsausbildung einwirken. ⑥⑦⑧

Arbeitsbiene (3 : 1)

Königin (3 : 1)

Drohn (3 : 1)

Voraussetzung für das Entstehen von Modifikationen ist die Veränderbarkeit der Merkmale. Die meisten Merkmale sind modifizierbar, durch die Umwelt beeinflußbar, umweltlabil. Einige Merkmale (■ die Blutgruppen beim Menschen) sind nicht durch die Umwelt modifizierbar, sie sind umweltstabil und werden so lange in gleicher Weise ausgeprägt, wie ihre Erbanlagen unverändert erhalten bleiben. Erbanlagen, die umweltlabilen Merkmalen zugrunde liegen, bedingen demgegenüber nicht die identische Ausbildung einer ganz bestimmten Merkmalsform; sie bestimmen nur die Art des Merkmals und die Grenzen, innerhalb derer das Merkmal variieren kann. Die Ausprägung des Merkmals (■ Größe oder Masse eines Organs oder eines Organismus) erfolgt im Zusammenwirken mit der Umwelt. Eine Veränderung über die Grenzen dieser genetisch fixierten Reaktionsnorm hinaus ist auch unter extremen Umwelteinflüssen nicht möglich.

① Welche Merkmale unterscheiden den Menschen von nahe mit ihm verwandten Arten? Nennen Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht in der Klasse 10 solche Merkmale, die als Artmerkmale zu verstehen sind!

② Nennen Sie zwei Beispiele für Nachkommen aus Kreuzungen verschiedener Arten!

③ Erläutern Sie den Begriff geschlechtliche Fortpflanzung! Vergleichen Sie geschlechtliche und ungeschlechtliche Fortpflanzung! Benutzen Sie dazu auch Bio i Ü, Seite 201 ff.!

④ Definieren Sie den Begriff Vererbung!

⑤ Erläutern Sie das Entstehen eineiiger und zweieiiger Zwillinge!

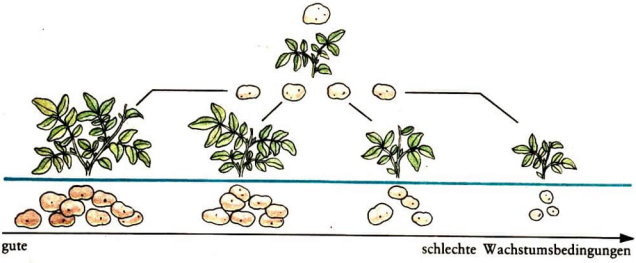
⑥ Nennen Sie gesellschaftliche Faktoren, die auf die körperliche und psychische Entwicklung des Menschen Einfluß nehmen können!

⑦ Definieren Sie den Begriff Umwelt!

⑧ Erläutern Sie die unterschiedliche Ausbildung von weiblichen Bienen als Modifikation!

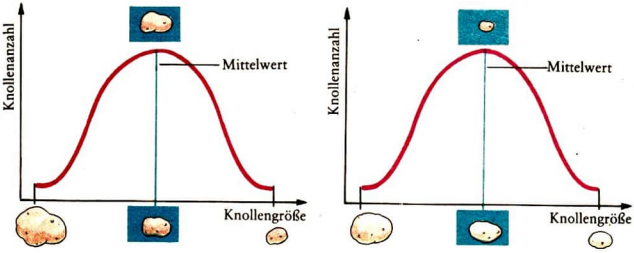
Durch Modifikationen können sich Organismen in einem genetisch begrenzten Ausmaß an veränderte Umweltbedingungen anpassen.

■ Die Schaffung optimaler Lebensbedingungen für Kulturpflanzen und Nutztiere führt zu besseren Erträgen und höheren Leistungen.



Durch differenzierende Umweltbedingungen unterschiedlich ausgebildete Individuen (■ Kartoffelpflanzen) sind in ihrem Erbgut aber nicht verändert; ihre Nachkommen werden unter übereinstimmenden Lebensbedingungen gleich sein. ①

■ Kleine und große Kartoffeln einer Stammpflanze liefern — unter gleichen Umweltbedingungen (■ gleiche Bodenqualität, gleiche Pflege) — gleiche Erträge. Sind optimale Anbaubedingungen für diese Kartoffelsorte gefunden, können darüber hinausgehende Veränderungen der Kulturbedingungen (■ höhere Düngergabe, reichlichere Bewässerung) nicht zu einer weiteren Ertragssteigerung führen.



Erträge verschieden großer Kartoffeln einer Sorte bei gleichen Bedingungen

Auch die meisten Merkmale des Menschen werden durch das Zusammenwirken von Erbanlagen und Umweltfaktoren geprägt. Im Gegensatz zu allen anderen Organismen ist der Mensch jedoch befähigt, seine Umwelt selbst zu seinen Gunsten zu gestalten. Mit dem Aufbau der kommunistischen Gesellschaftsordnung schafft er sich die Bedingungen für seine optimale körperliche und psychische Entwicklung. ②③

■ Die Erbanlagen monozygotischer („eineiiger") Zwillinge sind weitgehend identisch, da sie aus einer gemeinsamen Zygote hervorgegangen sind. Trotzdem unterscheiden sich die Paarlinge mit fortschreitendem Lebensalter in einigen körperlichen und psychischen Merkmalen immer mehr voneinander, da sie auch bei gemeinsamem Aufwachsen in vieler Hinsicht verschiedenen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Bei getrennt aufwachsenden monozygotischen Zwillingen sind die zu beobachtenden Unterschiede noch wesentlich größer. Trotzdem sind sie einander ähnlicher als dizygotische („zweieiige") Zwillinge, da ihre Reaktionsnormen identisch sind.

▶ *Die Gesamtheit der Merkmale eines Lebewesens — die Summe aller artspezifischen und nicht artspezifischen Einzelmerkmale (Phäne) — stellt den Phänotyp des Individuums dar. Die Gesamtheit der diesen Merkmalen zugrunde liegenden Erbanlagen, die im Zellkern lokalisiert sind, ist der Genotyp.*

▶ *Modifikationen sind durch Umweltfaktoren verursachte Veränderungen des Phänotyps ohne Beeinflussung des Genotyps.*

Auch der Genotyp, das heißt die genetische Information selbst, kann verändert werden. Diese Veränderungen sind Mutationen. Die durch Mutationen in ihrem Genotyp veränderten Lebewesen sind Mutanten.

Mutationen, die in den Erbanlagen von Körperzellen eintreten und zu Veränderungen in der Eiweißsynthese dieser Zellen beziehungsweise ihrer Tochterzellen führen, sind somatische Mutationen. Durch somatische Mutationen bedingte Veränderungen in der Merkmalsausbildung können sich bereits an Lebewesen vollziehen, die den verändernden Faktoren selbst ausgesetzt sind. Unter ihren durch geschlechtliche Fortpflanzung entstehenden Nachkommen finden sich diese phänotypischen Veränderungen nicht. Nur bei ungeschlechtlicher Vermehrung aus Zellen, in denen Mutationen auftraten, können die Nachkommen trotz des Wegfalls der verändernden Einflüsse auf den Genotyp die entsprechenden phänotypischen Veränderungen wieder aufweisen. ④

■ Eine unter natürlichen Bedingungen entstandene somatische Mutation ist die Ursache für die Herausbildung der Nabelorange. Die kernlose, wohlschmeckende Früchte tragenden Bäume sind über ungeschlechtliche Fortpflanzung erzeugte Nachkommen eines einzigen Baumes, der durch somatische Mutation in seinen Merkmalen (■ Samenbildung) verändert wurde.

Mutationen können auch in Keimzellen eintreten. Die betroffenen Lebewesen weisen dann, im Gegensatz zu Modifikationen und somatischen Mutationen, selbst keine abweichenden Merkmalsausbildungen auf. Die phänotypischen Veränderungen können erst in Folgegenerationen sichtbar werden. ⑤⑥

① Erläutern Sie die Bedeutung der ungeschlechtlichen Fortpflanzung für den Kulturpflanzenanbau! Nennen Sie Beispiele für ungeschlechtlich vermehrte Kulturpflanzen!

② Werten Sie im Hinblick auf die Beeinflussung von Merkmalsausbildungen durch Umweltfaktoren Maßnahmen unseres Staates zur Sozialpolitik!

③ Erläutern Sie in bezug auf den Zusammenhang von Merkmalsausprägung und Umweltfaktoren Ihre Kenntnisse über die Bedeutung der Stoffwechselzusammenhänge für eine gesunde Ernährung (↗ S. 91)!

④ Vergleichen Sie Modifikationen und somatische Mutationen! Berücksichtigen Sie dabei für beide Erscheinungen Ursachen sowie Folgen für die Nachkommen!

⑤ Vergleichen Sie somatische Mutationen und Mutationen in Keimzellen miteinander! Begründen Sie, warum Keimzellenmutationen erst im Phänotyp der Nachkommen deutlich werden können!

⑥ Erläutern Sie den Begriff Mutante!

Mutationen sind spontan erfolgende oder durch bestimmte Umweltfaktoren induzierte Veränderungen des Genotyps. Bei somatischen Mutationen können die Mutanten selbst, bei Mutationen in Keimzellen können erst Nachkommen Veränderungen des Phänotyps aufweisen.

Die durch Mutationen bedingte Variabilität der Art ist eine der wichtigsten Grundlagen für die stammesgeschichtliche Entwicklung der Lebewesen. Durch Mutationen hervorgerufene Veränderungen in der Ausbildung der Merkmale ermöglichen über den Weg der Auslese die Anpassung von Lebewesen an langandauernde Veränderungen der Umweltbedingungen und auf diese Weise schließlich die Artneubildung. ①②

Voraussetzung für die Möglichkeit der Paarung und der Zeugung fruchtbarer Nachkommen ist aber die Artkonstanz. Beide Notwendigkeiten — Konstanz der Art durch weitgehende Stabilität der genetischen Information und Variabilität infolge Veränderbarkeit (Mutabilität) der genetischen Information — stehen in engen Wechselbeziehungen zueinander. Ohne die durch Artkonstanz mögliche geschlechtliche Fortpflanzung können sich Mutationen nicht verbreiten (außer bei ungeschlechtlicher Fortpflanzung), ohne Mutationen können sich Organismen einer veränderten Umwelt nicht optimal anpassen und sterben aus. Arten können also nur relativ konstant sein. ③④

Relative Konstanz der Arten und Variabilität der Arten sind als Einheit von einander bedingenden Seiten eines dialektischen Widerspruchs zu verstehen.

Arten sind durch bestimmte Merkmale charakterisiert. Diese sind an Erbanlagen gebunden, die weitgehend unverändert durch geschlechtliche oder ungeschlechtliche Fortpflanzung von Generation zu Generation weitergegeben werden. Arten weisen eine relative Konstanz auf.

Die Ausbildung von Artmerkmalen kann durch Umwelteinflüsse in bestimmten Grenzen variieren, ohne daß dabei die Erbanlagen verändert werden. Solche Variationen sind Modifikationen.

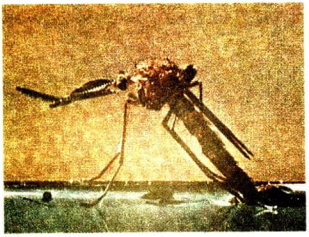
Die Ausbildung der Artmerkmale kann durch Veränderungen der Erbanlagen variieren. Veränderungen der Erbanlagen sind Mutationen; sie erfolgen spontan oder sind ebenfalls durch Umwelteinflüsse induziert.

Durch die Wirkung von Modifikationen und Mutationen sind die Arten relativ variabel.

Die relative Konstanz und die Variabilität der Arten sind Voraussetzung für die Erhaltung und Entwicklung der Arten.

① Erläutern Sie den Begriff Variabilität!
② Erläutern Sie den Begriff Auslese!
③ Charakterisieren Sie dialektische Widersprüche! Wenden Sie den Begriff dialektischer Widerspruch auf Konstanz und Variabilität der Art an!
④ Beruht die Übergewichtigkeit beim Menschen auf Modifikation oder auf Mutation? Begründen Sie Ihre Meinung! Nennen Sie Ursachen für das Auftreten von Übergewichtigkeit!
⑤ Stellen Sie anhand Ihrer Kenntnisse über Bau und Funktion des Zellkerns dessen Bestandteile und deren Funktion in einer Tabelle zusammen! Berücksichtigen Sie die Funktion des Zellkerns als Bestandteil der Zelle!

Riesenchromosomen aus der Speicheldrüse der Anophelesmücke (800 : 1)



Anophelesmücke (stark vergrößert)

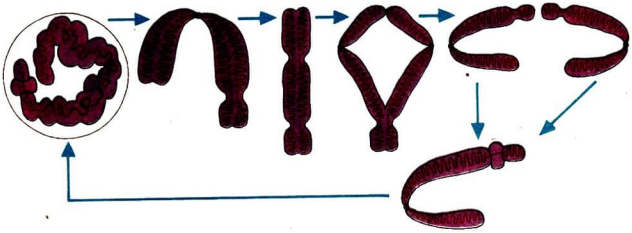
► *Die Übertragung genetischer Informationen von Generation zu Generation ist dadurch möglich, daß die Informationen an materielle Strukturen gebunden sind.*

Die Träger der Erbanlagen, die Erbträger, sind Nukleinsäuremoleküle, die frei im Zellplasma liegen oder innerhalb der Zelle von bestimmten Membranen umschlossen sind (↗ S. 11). Sie enthalten durch ihre Struktur die Anweisungen für die Synthese spezifischer Eiweiße und damit für den Aufbau und die Funktion der Zellen und des gesamten Organismus. Sie können sich originalgetreu verdoppeln, so daß mit ihnen die genetische Information der Zelle bei der Zellteilung weitergegeben werden kann.

Bei allen kernhaltigen Organismen bilden die Nukleinsäuremoleküle gemeinsam mit bestimmten Eiweißen komplexe Strukturen, die Chromosomen, welche im Zellkern (↗ S. 12) lokalisiert sind. ⑤

Chromosomen. Chromosomen weisen im Verlauf der Zellteilungszyklen einen charakteristischen Formwandel auf.

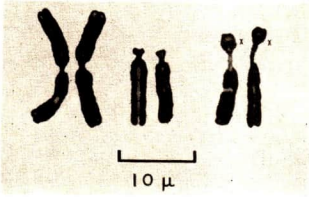
Aus einer „Funktionsform", dem Chromatin (↗ S. 12), gehen sie während der Kernteilung in eine kompakte „Transportform" und nach Abschluß der Zellteilung wieder in die



Schematische Darstellung des Chromosomenformwandels während der Zellteilungszyklen

„Funktionsform" über. In dieser „Form" werden sie im Stoffwechsel der Zelle wirksam, und jedes Chromosom verdoppelt sich. Diese Doppelchromosomen sind während der Kernteilung mikroskospisch gut sichtbar.

▶ *Anzahl und Struktur der Chromosomen sind artspezifisch.*

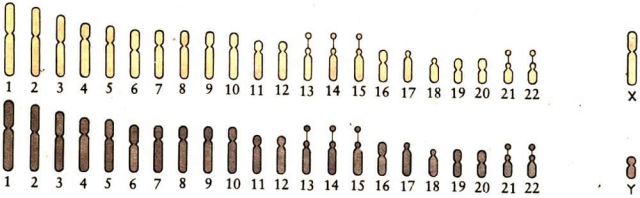


Chromosomenzahl diploider Organismen	
Garten-Erbse	14
Roggen	14
Mais	20
Kartoffel	48
Taufliege	8
Regenwurm	32
Rind	60
Mensch	46

Karyogramme von Säugetieren, ♀ (oben: Muntjak, unten: links Haushund, rechts Feldmaus

Auch innerhalb der Art Mensch sind Chromosomenanzahl und -struktur gleich. Alle Menschenrassen sind genetisch gleichwertig, sie weisen die gleiche phylogenetische Entwicklungshöhe auf. Bei einzelnen Individuen aller Rassen zu findende Besonderheiten in Chromosomenbestand und -struktur haben meist Krankheiten zur Folge (↗ S. 178 ff.). ①

Je nach der Phase des Individualzyklus ist der Chromosomensatz, die arttypische Anzahl der Chromosomen, einfach (haploid) oder doppelt (diploid). Alle höheren Organismen sind diploid, nur ihre reifen Keimzellen haploid.



Schematische Darstellung des diploiden (nicht verdoppelten) Chromosmensatzes eines Mannes

■ Reife menschliche Ei- und Samenzellen enthalten je 23 Chromosomen, die bei der Befruchtung entstehende Zygote und alle daraus sich entwickelnden Körperzellen enthalten je 46 Chromosomen. ②

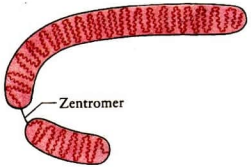
► *Im diploiden Chromosomensatz sind jeweils zwei Chromosomen morphologisch gleich, sie sind homologe Chromosomen.*

Eine Ausnahme bilden die sogenannten Geschlechtschromosomen, durch die das Geschlecht des Individuums charakterisiert ist. Bei den meisten Wirbeltieren, auch beim Menschen, sind die beiden Geschlechtschromosomen bei männlichen Individuen in Größe und Form verschieden. Sie werden als X- und als Y-Chromosom bezeichnet. Weibliche Individuen besitzen dagegen zwei X-Chromosomen und kein Y-Chromosom. ③④⑤

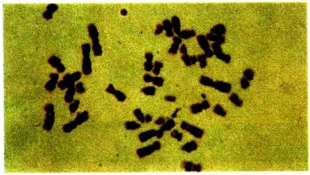
Jedes Chromosom weist eine tiefe Einschnürung auf. Diese Einschnürung, die sich bei unterschiedlichen Chromosomen an jeweils anderer Stelle befindet, ist das Zentromer. An ihm setzen bei der Kernteilung die Spindelfasern an, die die Chromosomenspalthälften auseinanderziehen.

► *Jedes Chromosom ist morphologisch durch seine Länge und durch die Lage seines Zentromers charakterisiert.*

Die Unterschiede im Bau der Chromosomen ermöglichen die Einordnung der Chromosomen in Karyogramme. Durch Spezialfärbungen wird die Identifikation der Chromosomen erleichtert.



Schematische Darstellung eines Chromosoms



Chromosomen des Menschen nach Spezialfärbung

Jedes Chromosom wird zwischen aufeinander folgenden Kernteilungen verdoppelt. Es besteht dann aus zwei Chromatiden, die in der Zentromerregion miteinander verbunden sind (↗ Abb. S. 142 oben). ⑥

Die Chromosomen bestehen aus den Nukleinsäuren Desoxyribonukleinsäure (DNS) und Ribonukleinsäure (RNS) sowie aus Eiweißen. Die DNS beinhaltet die genetische Information. Die RNS steht in Verbindung mit Vorgängen der Realisierung der genetischen Information. Ein Teil der Eiweiße hat regulatorische Funktionen, ein anderer Teil Stützfunktionen.

① Werten Sie aufgrund der genetischen Einheitlichkeit der Art Mensch die in imperialistischen Staaten betriebene Rassendiskriminierung! Vergleichen Sie dazu auch Bio i Ü, Seite 131!

② Welchen Chromosomensatz enthalten die Eizellen und die Samen von Bedecktsamern? Begründen Sie Ihre Meinung!

③ Erläutern Sie die bei Kreuzungen von Wirbeltieren möglichen Kombinationen der Geschlechtschromosomen und die sich daraus ergebende Geschlechtsverteilung in der F_1-Generation! Benutzen Sie dazu auch Bio i Ü, Seite 132!

④ Nennen Sie den primären Unterschied zwischen Männern und Frauen!

⑤ Nennen Sie den genetischen Informationsträger menschlicher Zellen!

⑥ Erläutern Sie die Begriffe Chromosom, Chromatin, Chromatide!

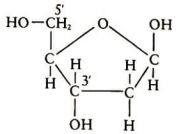
Desoxyribonukleinsäure. Die Desoxyribonukleinsäure (DNS) ist Träger der Erbinformation bei allen kernhaltigen Organismen, bei Spaltpflanzen und bei den meisten Viren.

▶ *Die DNS besteht aus Zucker, stickstoffhaltigen organischen Basen und Phosphorsäure.*

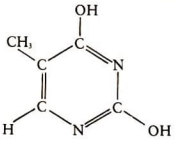
Der Zucker der DNS ist Desoxyribose; die organischen stickstoffhaltigen Basen sind Zytosin (C) und Thymin (T) sowie Guanin (G) und Adenin (A). Je ein Molekül Desoxyribose verbindet sich unter Wasserabspaltung mit einer der vier organischen Basen; unter weiterer Wasserabspaltung wird Phosphorsäure angelagert. Je nachdem, welche Base beteiligt ist, entsteht so eines der vier möglichen Nukleotide, die die Grundelemente der DNS-Moleküle bilden. In einem DNS-Molekül lebender Organismen sind mindestens 70 bis einige Millionen Nukleotide aneinandergefügt (■ die längste bisher gefundene DNS-Kette umfaßt etwa 10^7 Nukleotide, das entspricht einer Länge von ungefähr 3 mm). ①

Bestandteile der DNS

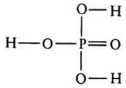
Desoxyribose



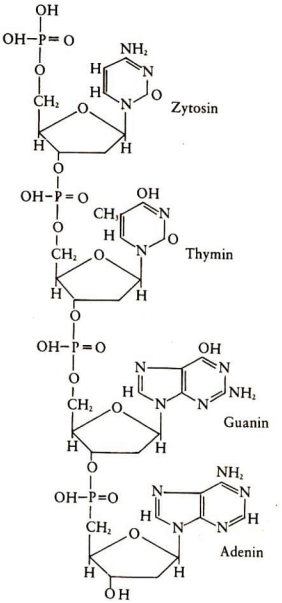
Organische Basen (■ Thymin)



Phosphorsäure



Tetranukleotid - Fragment der DNS



Durch die Verknüpfung der einzelnen Nukleotide über die 3′- und 5′-Kohlenstoffatome der Zucker erhält der Polynukleotidstrang eine Polarität, die für die Struktur der DNS, aber auch für die identische Replikation (↗ S. 151 f), die Reparatur von DNS-Schäden und die Eiweißsynthese (↗ S. 166 f) außerordentlich wichtig ist.

Das eine Ende der Polynukleotidkette (5′-Ende) trägt am 5′-Kohlenstoffatom ein freies Phosphorsäuremolekül, am andern Ende der Kette (3′-Ende) ist das 3′-Kohlenstoffatom frei.

▶ *DNS-Moleküle sind Polynukleotide. Sie erhalten durch die Art der Bindung zwischen den einzelnen Nukleotiden Polarität.*

Die Anzahl und die Reihenfolge der vier verschiedenen Nukleotide beziehungsweise ihrer Basen sind in jedem DNS-Abschnitt anders. In der Nukleotid- beziehungsweise Basenfolge ist die genetische Information verschlüsselt. Die spezifische Aufeinanderfolge der einzelnen Nukleotide beziehungsweise Basen stellt Anweisungen dar zur Synthese von jeweils spezifischer RNS und über diese zur Synthese von spezifischen, nur der jeweiligen Reihenfolge der Nukleotide entsprechenden Eiweißen. Diese Eiweiße bewirken im wesentlichen die Merkmalsausbildung. Die unterschiedliche Aneinanderreihung der vier Nukleotide ist damit Ursache der Vielfalt der Organismen und ihrer Merkmale.

▶ *Die genetische Information ist in der Basenfolge der DNS verschlüsselt gespeichert.*

In der einsträngigen Form (↗ Abb. S. 144) liegt die DNS nur bei einigen Bakteriophagen und einigen anderen Viren vor.

Bei den meisten Phagen und Viren sowie bei allen anderen Organismen besteht das DNS-Molekül aus zwei Polynukleotidsträngen. Diese verlaufen bezüglich ihrer 3′-5′-Verbindungen in gegensinniger Richtung. Sie sind durch Wasserstoffbrücken zwischen den gegenüberliegenden Basen miteinander verbunden.

Aus stereochemischen Gründen ist jeweils nur die Paarung von Zytosin mit Guanin sowie von Thymin mit Adenin möglich. Dadurch ist die Aufeinanderfolge der Nukleotide beziehungsweise der Basen, die Basensequenz, des einen Strangs durch die des anderen Strangs vorgegeben.

Die jeweils zusammenpassenden Basen beziehungsweise die beiden DNS-Einzelstränge sind einander komplementär. ②

Das Basenpaar C—G wird durch drei Wasserstoffbrücken, das Basenpaar A—T durch zwei Wasserstoffbrücken verbunden.

Die zwei derart miteinander verknüpften Polynukleotidstränge sind so umeinander gedreht, daß sie eine langgestreckte Doppelschraube bilden. Eine Schraubenwindung umfaßt etwa 10 Nukleotidpaare und hat eine Höhe von 3,4 nm. ③④

Die Basenpaare stehen dabei rechtwinklig zur (gedachten) Schraubenachse. Sie sind im Inneren der von Zucker und Phosphat gebildeten Doppelspirale ähnlich den Sprossen einer in sich verdrehten Strickleiter angeordnet. Nach dem Gehäuse der Weinbergschnecke *Helix pomatia* wird die ebenfalls „rechtsdrehende" DNS-Doppelschraube Doppelhelix genannt. Eine gelegentlich vorkommende, erst in jüngster Zeit gefundene „linksdrehende" DNS ist eventuell für ungeordnetes Wuchern von Zellen, wie es für Krebsgeschwülste kennzeichnend ist, verantwortlich.

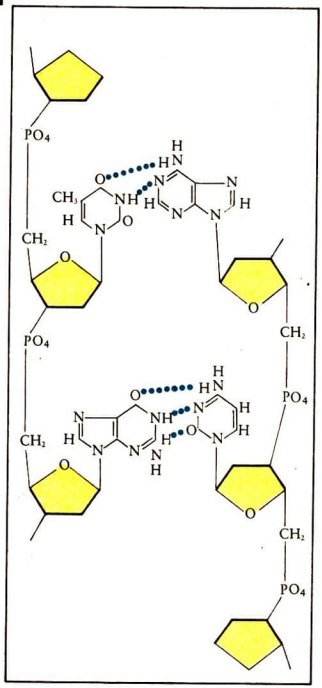
Erstmals beschrieben wurde diese DNS-Struktur 1953 von dem Amerikaner James

① Erläutern Sie anhand der Abbildungen auf den Seiten 144 und 146, welche Nukleotidbestandteile an der Verknüpfung zu DNS-Molekülen beteiligt sind!

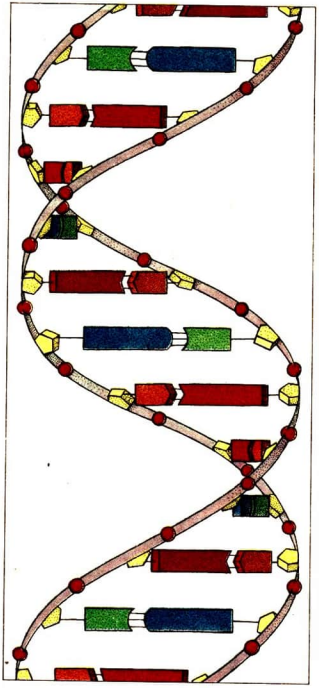
② Schreiben Sie von dem DNS-Strang mit der Basenfolge Adenin-Zytosin-Zytosin-Guanin-Thymin-Adenin die Basenfolge des Komlementärstranges auf!

③ Berechnen Sie die Länge eines DNS-Moleküls, das 2×5^{10} Nukleotidpaare enthält!

④ Berechnen Sie die Anzahl der Windungen in einem DNS-Molekül, das 1,8 mm lang ist!



Wasserstoffbrückenbindung zwischen komplementären Basen in der DNS



Schematische Darstellung der DNS-Spirale (gelb: Zucker; rot: Phosphorsäure; blau, grün, orange, lila: Basen)

D. WATSON (geb. 1928) und dem Engländer Francis H. C. CRICK (geb. 1916). Sie wurden dafür 1962 gemeinsam mit einem weiteren Forscher mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

▶ *Die DNS der meisten Organismen ist eine Doppelhelix aus zwei Polynukleotidsträngen mit gegenläufiger Polarität. Die Stränge sind durch Wasserstoffbrücken zwischen den Basen A und T sowie G und C miteinander verbunden.*

(1) Nennen und beschreiben Sie Bestandteile menschlicher Zellen, in denen sich Desoxyribonukleinsäure befindet!

Die DNS unterliegt aufgrund ihrer besonderen Struktur im Gegensatz zu allen anderen die Zelle aufbauenden Substanzen kaum Umbauvorgängen. Die in ihr durch die Basensequenz verschlüsselt gespeicherte genetische Information ist dadurch relativ stabil. Das Prinzip der Paarung komplementärer Basen ist aber nicht nur von Bedeutung für den Molekülaufbau und die Informationsspeicherung in diesem Kodesystem. Es ermöglicht zugleich die originalgetreue Vermehrung der Nukleinsäure-Moleküle und die Abgabe der Information für die Eiweißsynthese. Die grundlegende Bedeutung dieser Eigenschaften wird durch die Tatsache belegt, daß die DNS — besonders die doppelsträngige — als Informationsträger die weiteste Verbreitung im Organismenreich gefunden hat.

▶ *Die Struktur der DNS ermöglicht die große Stabilität der genetischen Information, die Abgabe der Information für die Eiweißsynthese und die originalgetreue Weitergabe der Information an die Nachkommen.*

Die Anordnung der DNS in Chromosomen ist noch weitgehend ungeklärt. Da das DNS-Molekül um ein Vielfaches länger ist als das Chromosom, dessen Bestandteil es ist, muß es irgendwie gefaltet und/oder sekundär spiralisiert im Chromosom verpackt sein.

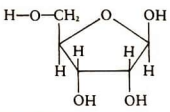
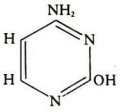
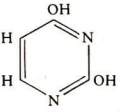
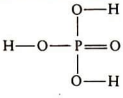
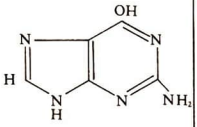
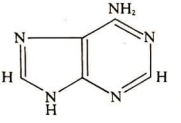
■ Die Gesamtlänge der in einem diploiden menschlichen Zellkern enthaltenen DNS beträgt ausgestreckt fast 2 m, die Länge der Chromosomen aber nur einige µm.

■ Die Gesamtlänge der in einem diploiden Zellkern der Fruchtfliege *(Drosophila melanogaster)* vorhandenen DNS übertrifft mit etwa 40 mm mehrfach die Körperlänge des Insekts. ①

Ribonukleinsäure. Die Ribonukleinsäure (RNS) ist an einer Reihe von Vorgängen zur Realisierung der genetischen Information beteiligt. Bei einigen Bakteriophagen und Viren ist sie — wie die Desoxyribonukleinsäure bei allen anderen Organismen — Träger der genetischen Information. Die RNS zeigt in ihrem Bau viele Übereinstimmungen mit der DNS.

▶ *Die RNS besteht aus Zucker, stickstoffhaltigen organischen Basen und Phosphorsäure.*

Der Zucker der RNS ist Ribose; die Basen der RNS sind Zytosin (C) und Urazil (U) sowie Guanin (G) und Adenin (A).

Bestandteile der RNS		
Ribose	**Organische Basen**	
	Zytosin 	Urazil 
Phosphorsäure 	Guanin 	Adenin 

Je ein Molekül Ribose verbindet sich — analog der Bildung von Desoxyribonukleotiden — mit einer der Basen Zytosin, Urazil, Guanin, Adenin. Diese Verbindungen bilden durch Verknüpfung mit Phosphorsäure unter Wasserabspaltung Ribonukleotide, die sich zu Polynukleotidsträngen vereinigen.

Die Polynukleotidstränge der RNS sind in der Regel nicht so lang wie die Polynukleotidstränge der DNS. Die RNS ist wie die DNS durch die 3′-5′-Verknüpfung der Zucker polarisiert.

DNS und RNS weisen also in ihrer Struktur viele Übereinstimmungen auf; sie unterscheiden sich aber zum Teil in ihren Grundbestandteilen: DNS enthält den Zucker Desoxyribose, RNS dagegen Ribose; DNS enthält die Base Thymin, RNS an ihrer Stelle die Base Urazil.

► *Die genetische Information ist in der RNS wie in der DNS in der Basenfolge verschlüsselt gespeichert.*

Einsträngige RNS-Moleküle sind nur bei einigen Bakteriophagen und anderen Viren (■ Tabakmosaikvirus, Erreger von spinaler Kinderlähmung, von Grippe, von Maul- und Klauenseuche) Träger der genetischen Information. Bei bestimmten Viren ist die genetische Information in doppelsträngiger RNS gespeichert.

mRNS und tRNS. Außer der Form der RNS, die Träger der genetischen Information des Individuums ist, gibt es RNS-Formen, die eine wesentliche Rolle bei der Übertragung der genetischen Information für die Eiweißsynthese bei allen Organismen spielen. Solche RNS-Formen sind vor allem die Boten(messenger)-RNS (mRNS) und die Transport(transfer)-RNS (tRNS). ①

Um die in der DNS verschlüsselte genetische Information für die Zelle wirksam werden zu lassen, um also die genetische Information zu realisieren, muß die Basensequenz der DNS in die Aminosäuresequenz der Eiweiße übersetzt werden. Der erste Schritt im Verlauf dieses Prozesses ist die Informationsabgabe: Die genetische Information wird an die mRNS abgegeben.

► *mRNS-Moleküle sind lineare Polynukleotid-Einzelstränge, die an einem Strang der DNS synthetisiert werden. Dabei wird die genetische Information an die mRNS abgegeben.*

Entsprechend der Basensequenz des DNS-Strangs werden dabei nach dem Prinzip der komplementären Basenpaarung passende Nukleotide aneinandergereiht. Es paaren sich

A im DNS-Strang mit U im RNS-Strang,
T im DNS-Strang mit A im RNS-Strang,
G im DNS-Strang mit C im RNS-Strang,
C im DNS-Strang mit G im RNS-Strang.

Die mRNS enthält also in ihrer Basensequenz die in der DNS verschlüsselte Information für die Aminosäuresequenz der Eiweiße. Ein weiterer Schritt der Realisierung der genetischen Information bei der Eiweißsynthese ist die Informationsübertragung durch die mRNS vom Zellkern zu den Ribosomen, den Orten der Eiweißsynthese.

► *Die mRNS (Boten-RNS) ist der Überträger der genetischen Information vom Zellkern zum Ort der Eiweißsynthese.*

An den Ribosomen (↗S. 15) findet die Synthese der Eiweiße statt (↗S. 169). Die dafür nötigen Aminosäuren werden von einer weiteren Form der RNS, der tRNS (Transport-RNS), zu den Ribosomen gebracht und dort in das zu synthetisierende Eiweißmolekül eingebaut.

Jedes tRNS-Molekül transportiert eine bestimmte Aminosäure. Unter Mitwirkung der tRNS wird so die Basenfolge der mRNS in die Aminosäurefolge des Eiweißes übersetzt; die genetische Information wird entschlüsselt.

► *tRNS-Moleküle sind spezifische Aminosäureträger. Sie ermöglichen die Eiweißsynthese.*

tRNS-Moleküle werden an bestimmten Abschnitten eines DNS-Strangs gebildet. Sie bestehen aus nur 76 bis 85 Nukleotiden und enthalten teilweise besondere Basen; sie sind kleeblattartig strukturiert. ②

mRNS und tRNS sind ebenso wie andere Nukleinsäuremoleküle Träger genetischer Information. Zur Unterscheidung von primären Informationsträgern, die die Information verschlüsselt gespeichert an die nachfolgende Zellgeneration übertragen, werden sie als sekundäre Informationsträger bezeichnet. ③④

Identische Replikation der DNS. Die relative Konstanz der Arten ist dadurch gewährleistet, daß die in einer Zelle beziehungsweise bei den Eltern vorhandene genetische Information an die nächste Zellgeneration beziehungsweise die Nachkommenschaft weitergegeben werden kann.

Die Weitergabe der genetischen Information (Vererbung) erfolgt jeweils bei den Zellteilungen.

Bei zellkernhaltigen Organismen ist jede Zellteilung mit einer Kernteilung verbunden. Je nach Art der Verteilung der im Zellkern enthaltenen Chromosomen lassen sich zwei Formen der Kernteilung unterscheiden, die Mitose und die Meiose.

► *Durch die Mitose entstehen aus einer diploiden Zelle zwei diploide Tochterzellen oder aus einer haploiden Zelle zwei haploide Tochterzellen. Durch die Meiose werden aus einer diploiden Zelle vier haploide Zellen.* ⑤

Die DNS-Menge in den Kernen der zwei durch Mitose oder der vier durch Meiose entstandenen Zellen ist gemeinsam jeweils doppelt so groß wie die DNS-Menge im Kern der jeweiligen Mutterzelle. Vor Beginn der Teilung ist noch in der Mutterzelle eine Verdopplung des genetischen Informationsträgers erfolgt. Der Vorgang wird durch die vor der Zellteilung stattfindende Verdopplung der Chromosomen zu je zwei Chromatiden sichtbar.

■ Beim Menschen dauert die DNS-Replikation zwischen zwei mitotischen Teilungen etwa 7 bis 12 Stunden. Nach einer anschließenden Pause von 2 bis 5 Stunden folgt die etwa einstündige Teilung und auf diese, nach einer unterschiedlich langen Pause, die nächste Replikation.

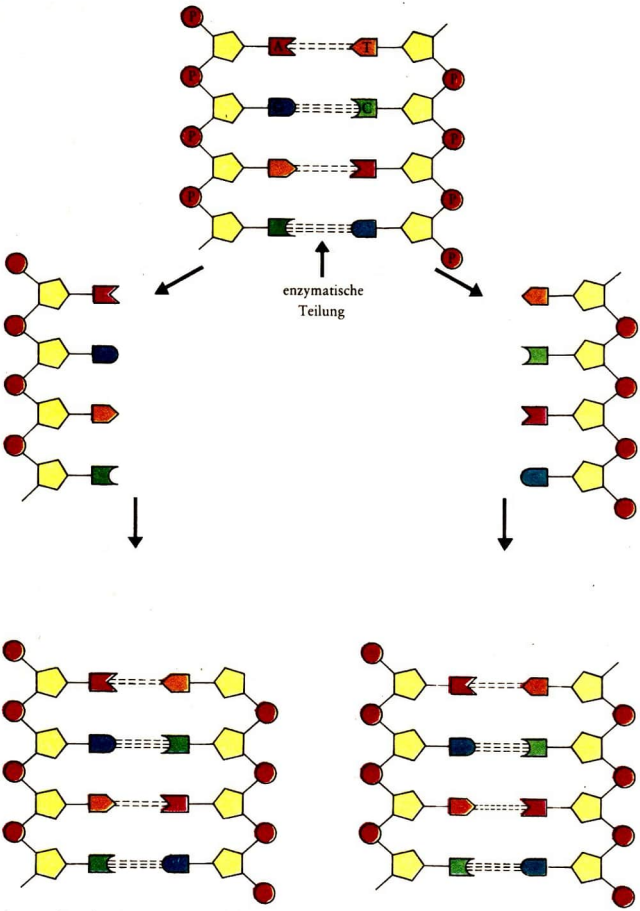
► *Die originalgetreue Verdopplung des genetischen Materials ist die identische Replikation. Sie ist Voraussetzung für Zellteilungen.*

Der Replikationsmechanismus der DNS konnte bisher nur für Bakterien weitgehend geklärt werden, bei denen der Informationsträger nicht in kompliziert strukturierte Chromosomen eingebaut und nicht von einer Kernmembran umschlossen ist. Nach ersten Erfahrungen mit DNS aus Zellkernen kann jedoch angenommen werden, daß die Replikation dieser DNS im Prinzip ähnlich abläuft wie die in Bakterien.

► *Die identische Replikation doppelsträngiger DNS beruht auf dem von* WATSON *und* CRICK *1953 formulierten Prinzip der komplementären Basenpaarung.*

Die beiden DNS-Einzelstränge einer doppelsträngigen DNS sind einander komplementär, sie verhalten sich zueinander wie eine Gußplatte und ihr Abdruck. Lösen sich die Wasserstoffbindungen zwischen den gegenüberliegenden Basen, werden beide Stränge voneinander gelöst.

① Erläutern Sie, aus welchen Bausteinen DNS und RNS bestehen!
② Stellen Sie Unterschiede und Übereinstimmungen im Bau von DNS und den Formen von RNS tabellarisch dar!
③ Charakterisieren Sie die unterschiedlichen Funktionen von DNS, mRNS und tRNS!
④ Erläutern Sie, inwiefern mRNS und tRNS Träger genetischer Information sind!
⑤ Nennen Sie anhand Ihrer Kenntnisse aus der Klasse 10 einige Beispiele für mitotische und meiotische Kernteilungen!



Schematische Darstellung der DNS-Replikation. Nach der enzymatischen Auftrennung des DNS-Doppelstranges werden an den Elternsträngen Tochterstränge synthetisiert

Jeder Strang kann nun als Matrize für die Synthese eines neuen Strangs dienen. An jeden der Elternstränge werden dazu Nukleotide angelagert, wobei stets Guanin mit Zytosin und Adenin mit Thymin gepaart werden. Nach Verbindung der angelagerten Nukleotide untereinander ist ein in seiner Nukleotidzusammensetzung komplementärer Tochterstrang entstanden.

► *Bei der identischen Replikation wird der DNS-Doppelstrang enzymatisch in zwei Einzelstränge gespalten. Jeder Einzelstrang dient als Matrize für die Bildung eines komplementären Strangs.*

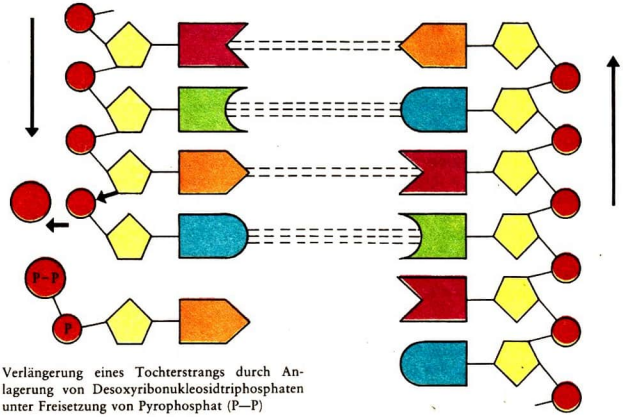
Die Spezifität der Basenbindung garantiert, daß die zwei nun vorliegenden, wieder doppelsträngigen DNS-Moleküle, die bei der Zellteilung an die beiden Tochterzellen weitergegeben werden, untereinander und auch mit dem elterlichen Doppelstrang identisch sind.

Voraussetzung für die identische Replikation ist, daß die zum Aufbau der einzufügenden Nukleotide notwendigen Bausteine durch den Stoffwechsel bereitgestellt werden, daß die die Verknüpfung bewirkenden Enzyme (■ DNS-Polymerase) vorhanden sind und daß die für den Syntheseprozeß erforderliche Energie zur Verfügung steht.

Die für die Synthese notwendige Energie ist in den in der Zelle vorhandenen Triphosphat-Bausteinen der DNS (↗ S. 144) enthalten.

Die Polynukleotidkette wächst, indem diese Triphosphate durch DNS-Polymerase an das 3′-Kohlenstoffatom des Zuckers des jeweils vorhergehenden Nukleotids herangeführt, Pyrophosphat (P—P) freigesetzt und der Phosphatrest an den Zucker gebunden wird.

■ Doppelsträngige RNS wird nach dem gleichen Prinzip wie doppelsträngige DNS repliziert, wobei Guanin mit Zytosin und Adenin mit Urazil gepaart werden. Einsträngige DNS und einsträngige RNS werden zum Zweck der Vermehrung zunächst in eine doppelsträngige Form überführt, die Replikation erfolgt dann wie bei doppelsträngiger DNS und RNS.



Verlängerung eines Tochterstrangs durch Anlagerung von Desoxyribonukleosidtriphosphaten unter Freisetzung von Pyrophosphat (P—P)

Die Synthese von RNS — einschließlich der von mRNS und tRNS — erfolgt wie die Synthese von DNS nach dem Prinzip der komplementären Basenpaarung. ①

Bei Vorhandensein von geeigneter „Matrizen-DNS" (■ einsträngige Virus-DNS) und der DNS-Bausteine ist es möglich, im Labor in Gegenwart von DNS-Polymerase physiologisch aktive DNS zu synthetisieren. DNS-Polymerase ist vermutlich auch an der Reparatur von DNS-Schäden beteiligt.

► *DNS-Schäden sind Veränderungen der Struktur der DNS, die zur Störung ihrer Funktion (Replikation oder Informationsabgabe) oder zur Veränderung ihres Informationsgehaltes führen.*

Bei Reparaturvorgängen werden aus DNS-Einzelsträngen schadhafte Nukleotidsequenzen enzymatisch herausgelöst und der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt. Beim Schließen der Lücken dient der gegenüberliegende, unversehrte DNS-Strang als Matrize. Diese Möglichkeit der Reparatur erhöht die Konstanz der genetischen Information und damit der Art. Doppelsträngige, derartige Reparaturvorgänge erlaubende DNS hat sich im Verlauf der Evolution vermutlich auch aus diesem Grund gegenüber einsträngiger DNS und RNS als primärer genetischer Informationsträger durchgesetzt.

Die DNS-Replikation läuft bei zellkernhaltigen Organismen in dem Zeitraum vor der Kernteilung ab. In diesem Stadium bilden die Chromosomen ein mehr oder weniger lockeres Chromatingerüst.

Verlauf der Mitose. Die Mitose ist ein Teilungsvorgang, in dessen Verlauf die Chromatiden jedes Chromosoms voneinander getrennt und auf die beiden Tochterkerne verteilt werden. Ihr Verlauf kann in vier Phasen gegliedert werden.

1. Phase (Prophase): Die vor der Mitose das Chromatingerüst bildenden Chromosomen kontrahieren sich durch Spiralisierung zunehmend zu feinen, gewundenen Doppelfäden. Jeder Doppelfaden wird von zwei Chromatiden gebildet, die im Zentromerbereich miteinander verbunden sind (↗ Abb. S. 153). Die Kernkörperchen werden aufgelöst, ihre Bestandteile übernehmen Aufgaben in der Eiweißsynthese. Zwischen entgegengesetzten Zellpolen wird der aus einer Vielzahl von Plasmafäden bestehende Spindelapparat ausgebildet, gleichzeitig wird die Kernmembran aufgelöst.

2. Phase (Metaphase): Die nun stark kontrahierten Chromosomen ordnen sich zur Äquatorialplatte der Zelle an, die senkrecht zu den beiden Spindelpolen steht. Dabei richten sie sich so aus, daß jeweils das Zentromer der einen Chromatide zu einem Spindelpol, das Zentromer der anderen Chromatide zum entgegengesetzten Pol gerichtet ist.

3. Phase (Anaphase): Die Zentromere der Chromatiden trennen sich voneinander. Die vollständig voneinander gelösten Chromatiden jedes Chromosoms werden durch die an den Zentromeren ansetzenden Spindelfasern als Tochterchromosomen zu entgegengesetzten Spindelpolen bewegt.

4. Phase (Telophase): Um die an den beiden Spindelpolen angelangten Tochterchromosomengruppen wird jeweils eine Kernmembran gebildet. Der Spindelapparat wird aufgelöst. Gleichzeitig entspiralisieren und verlängern sich die Chromosomen, sie gehen wieder in ihre Funktionsform (↗ S. 153), in ein aufgelockertes Chromatingerüst, über. Die Kernkörperchen erscheinen wieder. Die Mitose ist beendet.

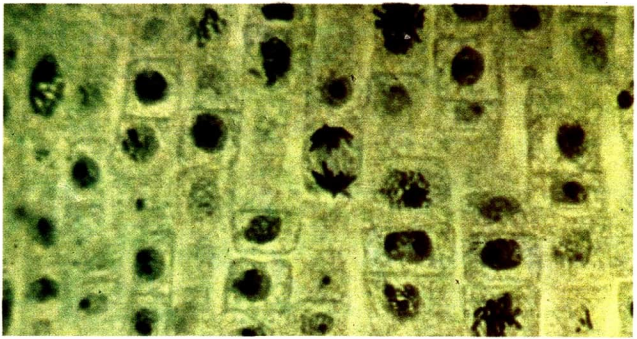
① Schreiben Sie das Schema der RNS-Strang-Bildung (entsprechend der DNS-Strang-Bildung, S. 150) auf! Beachten Sie, daß die Basen von DNS und RNS nicht in jedem Falle identisch sind!

② Erläutern Sie den Verlauf der Mitose!

Schematische Darstellung des Mitoseverlaufs

Auf die Kernteilung folgt in der Regel die Zellteilung. Dabei wird im Bereich der Äquatorialebene, von der Zellmitte zur Zellwand fortschreitend oder in umgekehrter Richtung, eine neue Zellmembran gebildet. Das Zellplasma wird durchgeschnürt. Die im Zellplasma vorhandenen Organellen (■ Mitochondrien und Plastiden) haben sich vorher durch Selbstteilung vermehrt, die entsprechenden Teilungsmechanismen sind im einzelnen noch weitgehend unbekannt. ②

► *Das Ergebnis der Mitose und der damit verbundenen Zellteilung sind zwei Tochterzellen, die bezüglich der Chromosomenanzahl und der Art der Gene untereinander und auch mit der Mutterzelle völlig gleich sind.*

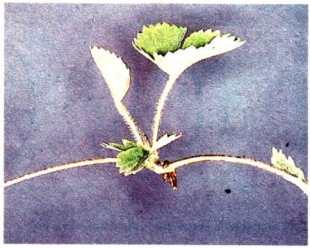


Kernteilungsstadien in jungen Pflanzenzellen (1000 : 1)

Der Mitosevorgang ist neben der identischen Replikation der DNS eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Konstanterhaltung des Genbestandes bei Wachstumsvorgängen vielzelliger Organismen sowie bei der ungeschlechtlichen Fortpflanzung. ①

■ Alle Körperzellen und die noch nicht in die Reifeteilung eingetretenen Keimzellen des Menschen sind durch zahlreiche aufeinanderfolgende mitotische Teilungen aus einer einzigen Zelle, der Zygote, hervorgegangen und enthalten die gleichen Erbanlagen.

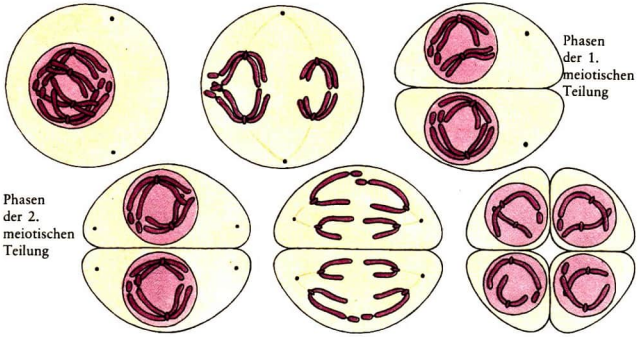
Ausläufer- und Knollenbildung bei Kartoffeln



Ausläuferbildung bei Erdbeeren

Verlauf der Meiose. Die Meiose besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Teilungsschritten, der ersten und der zweiten meiotischen Teilung; in ihrem Verlauf werden vier haploide Zellen gebildet. Beide Teilungsschritte können jeweils auch in vier Phasen gegliedert werden.

Die Meiose ist ebenso wie die Mitose ein genetisch gesteuerter Prozeß, dessen Ablauf in Abhängigkeit vom jeweiligen Objekt in vielen Details variieren kann. Viele Einzelheiten des Ablaufs bedürfen noch der Erforschung.



Schematische Darstellung des Meioseverlaufs

Erste meiotische Teilung. In der ersten meiotischen Teilung, der Reduktionsteilung, kontrahieren sich die als lockeres Chromatingerüst vorliegenden Chromosomen zunehmend. Die jeweils homologen Chromosomen, von denen ursprünglich eines vom Vater und eines von der Mutter stammt, legen sich aneinander. Jedes Paar homologer Chromosomen besteht aus vier Chromatiden, die untereinander unterschiedlich große Abschnitte austauschen können. Analog zu mitotischen Kernteilungen werden Kernkörperchen und Kernmembran aufgelöst, und der Spindelapparat wird gebildet.

Die Chromosomen ordnen sich dann paarweise so zur Äquatorialplatte an, daß die homologen Chromosomen auf entgegengesetzten Seiten der Äquatorialplatte liegen. Welches von beiden hierbei auf der einen, welches auf der anderen Seite dieser Ebene liegt, ist dem Zufall überlassen (↗ Abb. S. 156). ②

Anschließend trennen sich die homologen Chromosomen voneinander und werden durch die Spindelfasern zu den entgegengesetzten Polen bewegt. Im Gegensatz zu mitotischen Teilungen bleiben die Zentromere der Chromosomen hierbei ungeteilt, so daß aus jeweils zwei Chromatiden bestehende Chromosomen verteilt werden. Dabei gelangen durch die willkürliche Anordnung der homologen Chromosomen in der Äquatorialplatte unterschiedlich viele vormals väterliche oder mütterliche Chromosomen auf die eine beziehungsweise andere Seite.

■ Bei n Chromosomenpaaren können so nur durch die Chromosomenverteilung 2^n genetisch verschiedenartige Teilungsprodukte gebildet werden. Beim Menschen, der 23 Chromosomenpaare aufweist, sind $2^{23} = 8\,388\,608$ genetisch unterschiedliche Teilungsprodukte möglich. ③

Haben die Chromosomen die Pole erreicht, wird der Spindelapparat aufgelöst. Je nach Organismenart können die Bildung von Kernmembranen sowie die Zellteilung erfolgen oder ausbleiben. In den Teilungsprodukten ist die Chromosomenanzahl auf die Hälfte, die haploide Anzahl, reduziert (Reduktionsteilung).

Zweite meiotische Teilung. Nach einer Pause, die bei den einzelnen Organismenarten verschieden lang ist, beginnt die zweite meiotische Teilung, die Äquationsteilung. Sie gleicht in ihrem Ablauf weitgehend einer mitotischen Teilung von Körperzellen. In der Pause zwischen den beiden meiotischen Teilungen erfolgt aber keine DNS-Replikation.

Die Chromosomen, falls entspiralisiert, kontrahieren sich wieder; sind Kernmembranen gebildet worden, werden sie aufgelöst; neue Spindelapparate entstehen.

Die Chromosomen ordnen sich wie in einer Mitose zur Äquatorialplatte an; ihre Zentromere, die die Chromatiden jedes Chromosoms bisher zusammengehalten haben, teilen sich.

Die voneinander getrennten Chromatiden werden als Tochterchromosomen zu den jeweiligen Polen des Spindelapparates bewegt.

Zum Abschluß der Meiose strecken sich die Chromosomen und werden zum Chromatingerüst. Neue Kern- und Zellmembranen werden gebildet. ④⑤

① Werten Sie die Tatsache, daß zahlreiche Kulturpflanzensorten nicht geschlechtlich über Samen, sondern ungeschlechtlich (■ durch Ausläufer, durch Pfropfung) vermehrt werden, unter genetischer Sicht! Erläutern Sie ihre Bedeutung für die Züchtung!

② Erklären Sie, warum bei den homologen Chromosomenpaaren jeweils ein Chromosom mütterlicher und eines väterlicher Herkunft ist!

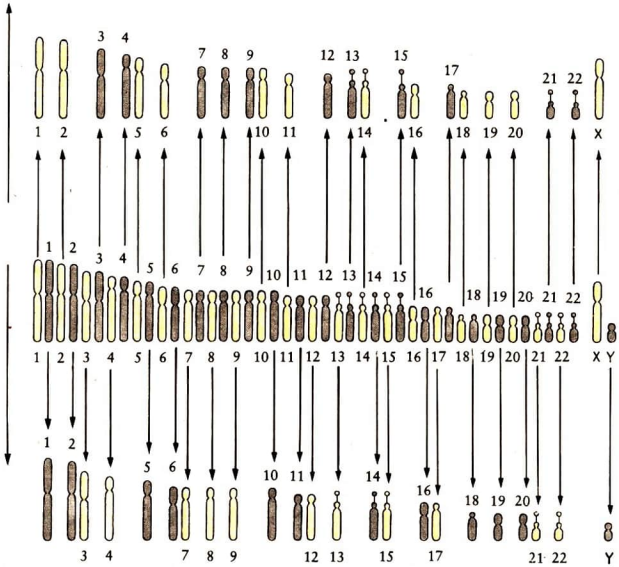
③ Begründen Sie die Ähnlichkeit und die Unterschiedlichkeit von Geschwistern!

④ Erläutern Sie anhand der Schemadarstellung auf Seite 154 den Ablauf der Meiose!

⑤ Stellen Sie die möglichen Unterschiede in den Abläufen der zweiten meiotischen Teilung und einer mitotischen Teilung heraus!

In der ersten meiotischen Teilung, der Reduktionsteilung, wird die Chromosomenanzahl vom diploiden auf den haploiden Satz reduziert. In der zweiten meiotischen Teilung, der Äquationsteilung, trennen sich die Chromatiden der Chromosomen des haploiden Satzes voneinander. Das Resultat der Meiose und der damit verbundenen Zellteilungen sind vier Zellen mit haploiden Chromosomensätzen, die genetisch verschiedenartig sein können.

Die Meiose führt bei höheren Organismen (■ Wirbeltiere, Samenpflanzen) zur Bildung haploider Samen- und Eizellen.



Schematische Darstellung der Chromosomenverteilung in der Reduktionsteilung (■ Mensch)
Die Chromatiden sind nicht getrennt gezeichnet

■ Beim Menschen werden bei der Eizellenbildung in der ersten meiotischen Teilung ein großes plasma- und dotterreiches Teilungsprodukt und ein kleines plasmaarmes Polkörperchen gebildet. Die erste meiotische Teilung beginnt zur Zeit der Geburt, die zweite beim Follikelsprung. Ergebnis sind ein großes, dotterreiches haploides Ei und drei plasmaarme haploide Polkörperchen. Die Polkörperchen besitzen ebenso wie das Ei einen vollständigen haploiden Chromosomensatz, sie sind jedoch aufgrund ihres Dottermangels nicht entwicklungsfähig. Als Ergebnis der Meiosevorgänge im männlichen Geschlecht, die nach Eintritt der Pubertät ablaufen, entstehen vier gestaltlich und funktionell gleiche Samenzellen.

Rekombination. Die zufällige Verteilung der homologen Chromosomen im Verlauf der ersten meiotischen Teilung sowie der Austausch von Chromatidenstücken sind wesentliche Ursachen dafür, daß die bei den Vorfahren ausgeprägten Merkmale bei den Nachkommen in abweichenden Kombinationen auftreten.

Im Jahr 1865 zog der in Brünn (heute Brno, ČSSR) wirkende Augustinermönch Johann Gregor MENDEL (1822 bis 1884) aus Kreuzungsversuchen mit Pflanzen den Schluß, daß die Ausbildung von Merkmalen und ihre Weitergabe auf die Nachkommen auf Erbanlagen zurückgeht, die frei kombinierbar sind. Für diese Erbanlagen prägte 1909 der Schwede W. JOHANNSEN (1857 bis 1927) den Begriff „Gen". Die Gen-Definition hat mit fortschreitender Erkenntnis mehrfache Wandlungen erfahren.

▶ *Ein Gen (Erbanlage) ist ein Abschnitt eines DNS-Moleküls, der die Information für die Synthese eines spezifischen Eiweißes enthält.*

Das durch das Gen bedingte Eiweiß wird allein oder gemeinsam mit anderen unter Einflußnahme der Umwelt an der Ausprägung eines oder mehrerer bestimmter Merkmale wirksam. Die Merkmale eines Individuums (■ äußerer und innerer Bau, physiologische Besonderheiten) sind somit von der Basensequenz der ihnen jeweils zugrunde liegenden Gene abhängig. Unterschiedlichen Ausprägungen eines bestimmten Merkmals bei verschiedenen Individuen müssen demzufolge, sofern nicht Umweltfaktoren allein die Ursache sind, unterschiedliche Basensequenzen der betreffenden Gene zugrunde liegen. Diese voneinander abweichenden Zustände sind durch Mutationen entstanden. Sie werden als Allele des betreffenden Gens bezeichnet.

▶ *Allele sind Zustandsformen eines Gens, die voneinander abweichende Informationen zur Synthese bestimmter Eiweiße mit unterschiedlicher Aminosäuresequenz enthalten.*

Da ein Gen durchschnittlich etwa 1000 Nukleotidpaare umfaßt, sind im allgemeinen sehr viele verschiedene Änderungen möglich, die als Allele wirksam werden, unter Umständen aber auch ohne Auswirkungen bleiben können.

■ Die A-B-0-Blutgruppen beim Menschen beruhen auf drei unterschiedlichen Allelen (A, B, 0) des Blutgruppengens.

Bei zellkernhaltigen Organismen sind die Gene auf mehrere Chromosomen verteilt. In haploiden Zellen ist jedes der unterschiedlich gestalteten Chromosomen einmal und damit auch jedes Gen einmal vorhanden. In diploiden Zellen ist jedes Chromosom zweimal (homologe Chromosomen) und damit auch jedes Gen zweimal vorhanden; eine Ausnahme bilden die Geschlechtschromosomen, die beispielsweise beim Menschen nur im weiblichen Geschlecht homolog sind.

▶ *Sind die auf homologen Chromosomen befindlichen Allele eines Gens gleich und bedingen die Synthese identischer Eiweiße, ist das Individuum — in dieser Anlage — reinerbig (homozygot).*

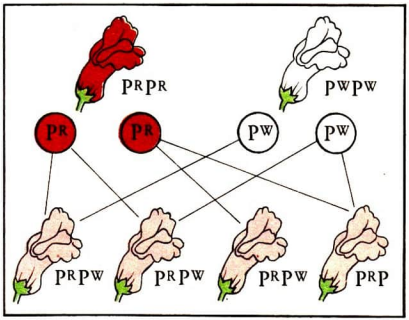
▶ *Sind die auf homologen Chromosomen befindlichen Allele eines Gens unterschiedlich und bedingen die Synthese von zwei verschiedenen Eiweißen, ist das Individuum — in dieser Anlage — mischerbig (heterozygot).*

Bei mischerbigen Individuen können beide Allele an der Merkmalsbildung beteiligt sein, wenn sie die Synthese zwar unterschiedlicher, aber doch funktionstüchtiger Eiweiße veranlassen. Der Phänotyp kann dann die Merkmale der für beide Allele Reinerbigen nebeneinander aufweisen, die Merkmalsausbildung ist kombinant; oder er kann eine Mittelform zwischen den Phänotypen der beiden möglichen Reinerbigen darstellen, die Merkmalsbildung ist intermediär.

■ Bei Personen, die ein Blutgruppenallel A und ein Blutgruppenallel B aufweisen, also mischerbig sind, werden beide Blutgruppenantigene nebeneinander gebildet, die Personen tragen das Blutgruppenmerkmal AB.

■ Das Gen für Blütenfarbe bei der japanischen Wunderblume *(Mirabilis japonica* L.) kann als Allel „rotes Pigment bildend" — bei Reinerbigkeit Blütenfarbe Rot — oder als Allel „kein Pigment bildend" — bei Reinerbigkeit Blütenfarbe Weiß — auftreten. Liegen in einem Individuum beide Allele vor, ist die Blütenfarbe Rosa.

Blütenstand eines mischerbigen Löwenmäulchens



Schematische Darstellung der intermediären Merkmalsausbildung (■ Löwenmäulchen)

Bei anderen Merkmalen kann bei mischerbigen Individuen eines der Allele in seiner Basensequenz so stark verändert sein, daß das von ihm bestimmte Eiweiß nicht funktionstüchtig ist. Die Merkmalsausprägung entspricht dann in der Regel der Ausprägung bei Individuen, die für das andere Allel reinerbig sind.

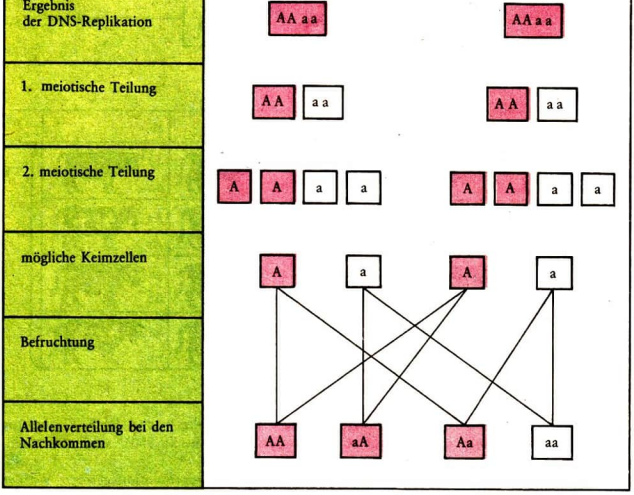
■ Personen mit der Blutgruppe A können zwei Blutgruppenallele A besitzen (reinerbig AA) oder nur ein Blutgruppenallel A und dazu ein Blutgruppenallel 0 aufweisen (mischerbig A0). Die unterschiedliche Allelenkombination ist aber im Phänotyp nicht zu erkennen, da die durch das Allel A bedingte A-Antigenmenge zur gleichen Merkmalsausbildung führt wie bei AA.

Bei mischerbigen Individuen ist dasjenige Allel eines Gens, das bei der Merkmalsausprägung allein den Phänotyp bestimmt, das dominante (überdeckende) Allel. Allele dagegen, die bei der Merkmalsausbildung phänotypisch nicht in Erscheinung treten, sind rezessive (unterdrückte) Allele; ihre Auswirkungen können nur dann erkannt werden, wenn sie auf beiden homologen Chromosomen vorhanden sind, wenn also das Individuum für sie reinerbig (homozygot) ist.

■ Personen, die reinerbig für das Blutgruppenallel 0 sind und somit die Blutgruppe 0 tragen, bilden kein spezifisches Antigen. Sie sind als Blutspender gut geeignet, da ihre roten Blutkörperchen nicht durch die im Empfängerorganismus (bei Personen mit Blutgruppe A, B oder 0) vorhandenen Antikörper agglutiniert und damit unwirksam gemacht werden können.

Merkmalsausbildungen, die durch unterschiedliche Allele bedingt sein können, welche zueinander dominant beziehungsweise rezessiv sind, sind dominant-rezessive Merkmalsausbildungen. Die dominanten Allele werden in der Regel mit Großbuchstaben (■ A), die rezessiven Allele mit zugehörigen Kleinbuchstaben (■ a) bezeichnet. ①②

Aus der Kreuzung von Organismen, die in einem bestimmten Gen verschieden reinerbig sind (P-Generation), gehen mischerbige Nachkommen (F_1-Generation) hervor. Werden diese genotypisch und phänotypisch einander gleichenden Individuen untereinander gekreuzt, gleichen von ihren Nachkommen (F_2-Generation) nur einige den mischerbigen Eltern, die anderen den reinerbigen Ausgangsformen. Diese Aufspaltung in unterschiedliche Genotypen und Phänotypen hat MENDEL in seinem Spaltungsgesetz formuliert; sie erfolgt in bestimmten Zahlenverhältnissen. Die unterschiedlichen Genotypen stehen im Verhältnis 1:2:1. Bei der intermediären Merkmalsausbildung ist das Zahlenverhältnis in Genotyp und Phänotyp gleich, bei dominant-rezessiver Merkmalsausbildung ist das Verhältnis im Phänotyp 3:1. (3)



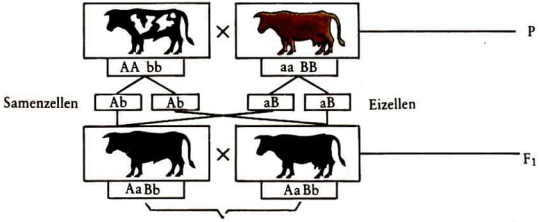
(1) Erläutern Sie die Begriffe intermediäre Merkmalsausbildung und dominant-rezessive Merkmalsausbildung! Stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der genetischen Ausgangssituation heraus!

(2) Nennen Sie die reinerbigen und mischerbigen Kombinationen der Allele B und b!

(3) Stellen Sie ein Schema für die Kreuzung einer roten mit einer weißen Japanischen Wucherblume (/ S. 158) bis zur F_2-Generation auf!

2. *Mendelsches Gesetz (Spaltungsgesetz): Werden in einem Allelenpaar gleichartig mischerbige Individuen miteinander gekreuzt, ist die direkte Nachkommenschaft nicht einheitlich, sondern spaltet nach bestimmten Zahlenverhältnissen auf.* ① ②

Eine nach dem 1. Mendelschen Gesetz entstandene Neukombination von Allelen in der F_1-Generation findet sich in der F_2-Generation nur noch bei einem Teil der Individuen, die anderen weisen die Geno- und Phänotypen der P-Generation auf. Dauerhafte Neukombinationen entstehen in der F_2-Generation, wenn zwei Individuen, die sich in mehr als nur einem Merkmal unterscheiden, miteinander gekreuzt werden. ③ ④



♂ \ ♀	AB	Ab	aB	ab
AB	AA BB	AA Bb	Aa BB	Aa Bb
Ab	AA Bb	AA bb	Aa Bb	Aa bb
aB	Aa BB	Aa Bb	aa BB	aa Bb
ab	Aa Bb	Aa bb	aa Bb	aa bb

F_2

Entstehung neuer Genotypen und Phänotypen durch Rekombination

Bei Kreuzung von zwei gleichen Individuen, die gegenüber der P- und der F_1-Generation neuartige Merkmalsausprägungen aufweisen (■ aabb in Abb. S. 160), sind alle Nachkommen untereinander und mit ihren Eltern gleich.

3. *Mendelsches Gesetz (Unabhängigkeitsgesetz oder Neukombinationsgesetz): Werden zwei Individuen, die sich in mehr als einem Allelenpaar unterscheiden, miteinander gekreuzt, so werden die Allele jedes Gens frei kombiniert und unabhängig von denen anderer Gene vererbt. Es können so Individuen entstehen, die gegenüber den Vorfahren neuartige Merkmalskombinationen aufweisen.*

Das Unabhängigkeitsgesetz gilt uneingeschränkt nur für solche Merkmale, bei denen die zugrunde liegenden Gene auf verschiedenen Chromosomen — beziehungsweise die beteiligten Allelenpaare auf verschiedenen Chromosomenpaaren — lokalisiert sind.

▶ *Das Entstehen neuer Merkmalskombinationen bei den Nachkommen durch Neukombination der Allele verschiedener Gene ist die Rekombination.*

Rekombination ist unter anderem von der zufälligen Lage der Chromosomenpaare in der Äquatorialplatte und dem Austausch von Chromatidenstücken in der ersten meiotischen Teilung sowie von der zufälligen Verschmelzung genetisch unterschiedlicher Keimzellen bei der Befruchtung abhängig. ⑤

Die durch die Rekombination erfolgende ständige Durchmischung des genetischen Materials ist neben der Umweltwirkung die Hauptursache der Variabilität innerhalb der Art. Variabilität wiederum ist Voraussetzung für Evolutionsprozesse. Auch Tier- und Pflanzenzüchtung sind auf Rekombinationsvorgänge angewiesen; aus der Vielfalt der durch Rekombination entstehenden Organismen werden diejenigen mit den dem Zuchtziel am nächsten kommenden Merkmalsausprägungen ausgewählt und zur Weiterzucht verwendet.

▶ Genetische Informationen sind an materielle Strukturen, DNS und RNS, gebunden. Bei zellkernhaltigen Organismen ist die DNS doppelsträngig und vorwiegend in den Chromosomen enthalten. Anzahl und Bau der Chromosomen sind artspezifisch.

DNS- und RNS-Moleküle sind Polynukleotide, in deren Basenfolge die genetische Information gespeichert ist. Durch die Struktur der DNS wird die Stabilität der genetischen Information, die Abgabe der Information für die Eiweißsynthese, die identische Replikation der genetischen Information, ihre Weitergabe und Rekombination während der mitotischen und meiotischen Kern- und Zellteilungen ermöglicht. Im Verlaufe der Mitose entstehen zwei genetisch identische Tochterzellen mit gleichem Chromosomensatz wie die Mutterzelle; während der Meiose entstehen vier Tochterzellen mit einfachem Chromosomensatz, die genetisch unterschiedlich sind.

Die DNS-Moleküle setzen sich aus zahlreichen Abschnitten zusammen, die jeder die Synthese eines bestimmten Eiweißes bedingen und damit die Ausbildung eines Merkmals beeinflussen. Diese DNS-Abschnitte, die Gene, müssen auf den jeweils homologen Chromosomen nicht identisch sein, sie können in ihrer Basenfolge mehr oder weniger voneinander differieren, die homologen Gene liegen dann als unterschiedliche Allele vor. Je nach der Kombination gleicher oder unterschiedlicher Allele eines Gens sind die betreffenden Individuen für dieses Merkmal rein- oder mischerbig. Die Merkmalsausbildung kann dabei dominant-rezessiv, kombinant oder intermediär sein. Die Auswirkung unterschiedlicher Allelenkombinationen auf Genotyp und Phänotyp der Nachkommen ist von MENDEL als gesetzmäßig erkannt und formuliert worden. Die Neukombination von Allelen zur Ausprägung neuer Merkmale ist für die Evolution und für die Züchtung von großer Bedeutung.

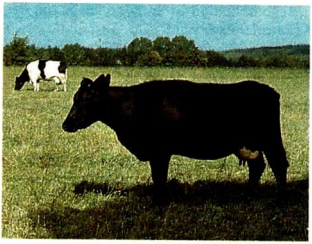
① Begründen Sie, weshalb aus den Mendelschen Gesetzen auf die Existenz von Genen geschlossen werden kann!

② Erläutern Sie, von welcher Allelenverteilung bei den Eltern das 1. Mendelsche Gesetz ausgeht! Benutzen Sie auch Bio i Ü, Seite 288!

③ Stellen Sie die möglichen Blutgruppen der Kinder aus der Elternkombination fest: A × B!

④ Errechnen Sie das Verhältnis, in dem die verschiedenen Genotypen und Phänotypen in der F_2-Generation auftreten, wenn die Eltern (P-Generation)
a) die Allelenkombination $R^IR^I \times R^SR^S$ haben!
b) die Allelenkombination BBll × bbLL haben!

⑤ Erläutern Sie den Begriff Rekombination!



DNS aus Zellen der Bauchspeicheldrüse eines jungen Rindes

Die Ausbildung der Merkmale ist eng mit der Eiweißsynthese verknüpft.

► *Eiweiße (Proteine) sind die wichtigsten Bestandteile aller zellulären Strukturen (Struktureiweiße) oder steuern als Enzyme die im Organismus ablaufenden biochemischen Reaktionen (Enzymeiweiße).*

Am Aufbau der Eiweiße sind 20 verschiedene Aminosäuren beteiligt, von denen 19 einheitlich gebaut sind und sich nur in der Struktur des spezifischen Restes unterscheiden. Lediglich Prolin bildet eine Ausnahme.

Schema	■ Valin	■ Asparaginsäure	■ Prolin
Spezifischer Rest CH COOH NH₂	CH₃ CH — CH₃ CH COOH NH₂	COOH CH₂ CH₂ COOH NH₂	CH₂ — CH₂ CH₂ CH N COOH H

Trotz der relativ gleichförmigen Konstruktion der Eiweiße sind die darauf aufbauenden Merkmale eines Organismus äußerst vielfältig. Die verschiedenen Eiweiße müssen also hinsichtlich ihrer Wirkungsweise unterschiedlich sein. Diese Unterschiedlichkeit ist darauf begründet, daß die Eiweiße aus unterschiedlich vielen (etwa 100 bis 1 000) Aminosäuren bestehen und daß die 20 möglichen Aminosäuren in den einzelnen Polypetidketten in jeweils anderer Anzahl und anderer Reihenfolge miteinander verknüpft sind.

Wie vielfältig die sich daraus ergebenden Möglichkeiten sind, läßt sich bei einem Vergleich erkennen: Werden — in sinnvoller Weise — 100 bis 1 000 Buchstaben aus unserem 26 Buchstaben umfassenden Alphabet aneinandergereiht, können sich daraus ihrem Inhalt nach völlig verschiedene Sätze ergeben.

Wie viele und welche Aminosäuren bei der Eiweißsynthese aneinandergereiht werden, ist bei zellkerntragenden Organismen im wesentlichen durch die in der chromosomalen DNS verschlüsselte genetische Information festgelegt. Aus der Basensequenz der DNS ergeben sich die Aminosäuresequenzen der Eiweiße.

Genetischer Kode

Die genetische Information ist linear in der Aufeinanderfolge der vier verschiedenen Nukleotide beziehungsweise Basen in der DNS verschlüsselt. Würde für den Einbau einer bestimmten Aminosäure jeweils nur ein Nukleotid allein bestimmend sein, könnten nur vier verschiedene Aminosäuren ins Eiweiß eingebaut werden. Auch zwei Nukleotide reichen zur Bestimmung einer Aminosäure nicht aus, denn sie erlauben nur $4^2 = 16$ verschiedene Kombinationen, das heißt die Verschlüsselung von nur 16 Aminosäuren.

▶ *Die Verschlüsselung der 20 verschiedenen Aminosäuren in den Eiweißmolekülen erfolgt durch einen Kode aus je drei aufeinanderfolgenden Nukleotiden. Der genetische Kode ist ein Triplettkode.*

Die Verwendung von drei der vier möglichen Basen ergibt $4^3 = 64$ Tripletts. Von diesen sind 61 für die Kodierung jeweils einer der 20 Aminosäuren festgelegt. Das bedeutet, daß die meisten Aminosäuren durch verschiedene Tripletts bestimmt werden können. Drei Tripletts sind „nonsense"-Tripletts, die keine Aminosäure kodieren, sondern als Stopptripletts das Ende eines Polypeptids bestimmen. (1)

Der genetische Kode kann auf dreifache Weise angegeben werden:
— als Basentriplett der DNS (Kodogen), dem eigentlichen, primären, Informationsspeicher, wobei in doppelsträngiger DNS nur die Tripletts eines Strangs als Kodogene dienen,

Basensequenzen im mRNS-Kode

Erstes Nukleotid	Zweites Nukleotid: Urazil (U)	Zytosin (C)	Adenin (A)	Guanin (G)	Drittes Nukleotid
U	UUU Phenylalanin UUC Phenylalanin UUA Leuzin UUG Leuzin	UCU Serin UCC Serin UCA Serin UCG Serin	UAU Tyrosin UAC Tyrosin UAA Stopp UAG Stopp	UGU Zystein UGC Zystein UGA Stopp UGG Tryptophan	U C A G
C	CUU Leuzin CUC Leuzin CUA Leuzin CUG Leuzin	CCU Prolin CCC Prolin CCA Prolin CCG Prolin	CAU Histidin CAC Histidin CAA Glutamin CAG Glutamin	CGU Arginin CGC Arginin CGA Arginin CGG Arginin	U C A G
A	AUU Isoleuzin AUC Isoleuzin AUA Isoleuzin AUG Methionin	ACU Threonin ACC Threonin ACA Threonin ACG Threonin	AAU Asparagin AAC Asparagin AAA Lysin AAG Lysin	AGU Serin AGC Serin AGA Arginin AGG Arginin	U C A G
G	GUU Valin GUC Valin GUA Valin GUG Valin	GCU Alanin GCC Alanin GCA Alanin GCG Alanin	GAU Asparagin-säure GAC Asparagin-säure GAA Glutamin-säure GAG Glutamin-säure	GGU Glyzin GGC Glyzin GGA Glyzin GGG Glyzin	U C A G

(1) Erläutern Sie, warum der genetische Kode mindestens aus Tripletts bestehen muß!

— als Basentriplett der mRNS (Kodon), die die Information von der DNS abgreift und zu den Ribosomen überträgt,
— als Basentriplett der tRNS (Antikodon), die die entsprechenden Aminosäuren zum Ort der Eiweißsynthese transportiert.

Ein Vergleich der Kodezeichen für die Aminosäuren zeigt, daß sich die Tripletts, die die gleiche Aminosäure kodieren, oft nur in der dritten Base unterscheiden (■ beim Alaninkode sind im dritten Nukleotid alle vier Basen möglich). Wesentlich für die Kodierung sind demzufolge in der Regel vornehmlich die ersten beiden Basen.

Ein Kode, in dem das gleiche Ereignis (■ Einbau einer bestimmten Aminosäure) durch mehrere voneinander verschiedene Kodons verschlüsselt ist, ist ein „degenerierter" Kode. Er stellt gegenüber einem „nicht degenerierten" Kode, bei dem jede Aminosäure nur durch ein Triplett kodiert würde, einen gewissen Schutzmechanismus dar.

■ Wird beim Abgreifen der genetischen Information des DNS-Tripletts CGA im mRNS-Kodon GCU fälschlicherweise als dritte Base an Stelle von Urazil eine andere der vier Basen eingebaut, kann trotzdem die Aminosäure Alanin im Eiweiß eingefügt werden, es kommt nicht zu einer Störung im Eiweißaufbau.

Der genetische Kode ist spezifisch. Das bedeutet, daß ein bestimmtes Kodon jeweils nur für eine Aminosäure steht. ①

► *Der genetische Kode ist spezifisch. Der genetische Kode ist hochgradig degeneriert.*

Die zwischen einem Startkodon und einem Stoppkodon befindliche, in mRNS übersetzte genetische Information wird vom Startpunkt aus in Richtung vom 5′-Ende zum 3′-Ende der mRNS Kodon für Kodon „gelesen". An jedes mRNS-Kodon wird dabei dasjenige tRNS-Antikodon angelagert, das die komplementäre Basenanordnung aufweist. Dabei treten keine Überlappungen in der Weise auf, daß ein Antikodon mit einer seiner Basen an ein Kodon, mit seinen beiden anderen Basen an ein anderes Kodon gebunden wird.

Zwischen den Kodons sind keine zusätzlichen Bausteine als „Kommas" zur Verhinderung der Überlappung eingebaut; sie sind in der Regel nicht nötig, da grundsätzlich im Dreierrhythmus abgelesen wird.

Das Fehlen von Interpunktionen im Kode hat jedoch Nachteile: Wird beispielsweise durch bestimmte Ereignisse der Dreier-Ableserhythmus gestört, gibt es keine Kontroll- oder Hilfsmechanismen, die das falsche Ablesen korrigieren. Es werden dann fehlerhafte Eiweiße aufgebaut.

■ mRNS -AUU--GCU--GAU--GGU--GUA--UGU--GGU-
Eiweiß - Ile -- Ala -- Asp -- Gly -- Val -- Zys -- Gly -
Ablesefehler
mRNS -AU-'-UGC--UGA --UGG--UGU--AUG--UGG--U-
Eiweiß - Zys --Stopp Try Zys Met -- Try -

Der die Synthese eines bestimmten Eiweißes bedingende DNS-Abschnitt, die Erbanlage oder das Gen, wird an einem Ende durch ein Triplett begrenzt, das die Aminosäure Methionin kodiert. Methionin bildet somit den Anfang der Polypeptidkette, es wird nach Beendigung der Eiweißsynthese in vielen Fällen wieder abgespalten.

Am anderen Ende des Gens steht eines der drei DNS-Tripletts, die keine Aminosäure bestimmen, eines der nonsense-Tripletts, die als Stopp-Tripletts die Synthese des Eiweißmoleküls beenden.

Das mRNS-Kodon AUG bestimmt bei kernhaltigen Organismen den Beginn der Synthese eines Eiweißes, die Kodone UAA, UAG und UGA führen zum Abbruch der Polypeptidkette. Der Triplettsequenz in der DNS und der RNS entspricht die Aminosäuresequenz der Polypeptidkette.

■

| | Startkodon | | |

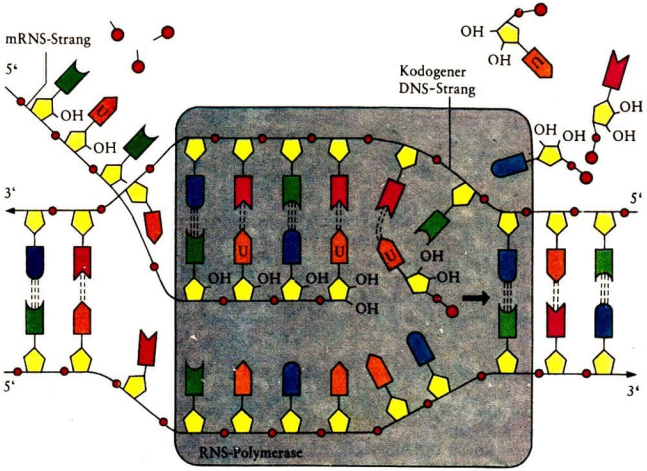
Transkription der genetischen Information

▶ *Im Prozeß der Transkription wird die in der DNS verschlüsselte genetische Information ohne Änderung des Informationsgehaltes in mRNS umgeschrieben.*

Die meiste DNS ist in Chromosomen lokalisiert und damit bei den meisten Organismen im Zellkern eingeschlossen, die Eiweißsynthese findet aber an den Ribosomen statt. Die Information für die Eiweißsynthese kann also nicht direkt von der DNS abgenommen werden, muß aber doch zum Ort der Eiweißsynthese gelangen. Die Übertragung der genetischen Information für die Eiweißsynthese wird durch eine RNS, die Boten-RNS (messenger-RNS, mRNS), vollzogen, die an der DNS synthetisiert wird. Dabei wird die genetische Information von DNS auf mRNS umgeschrieben.

Diese Transkription wird durch das Enzym RNS-Polymerase (Transkriptase) katalysiert. Dieses Enzym ist DNS-abhängig: Es ist nicht fähig, Nukleotide zufällig, ohne Benutzung einer DNS-Matrize, aneinanderzureihen. Grundlage der Transkription der genetischen Information ist die Gesetzmäßigkeit der komplementären Basenpaarung.

RNS-Polymerase wird zunächst an bestimmte Stellen der DNS-Doppelhelix gebunden. Mit Beginn der Transkription öffnet die RNS-Polymerase den DNS-Doppelstrang in diesem Bereich durch Lösen der die Stränge verbindenden Wasserstoffbrücken. Im Gegensatz zur Replikation der DNS (↗ S. 149), bei der an beiden komplementären Strängen durch die DNS-Polymerase neue DNS synthetisiert wird, liest die RNS-Polymerase im Transkriptionsprozeß aber nur einen der beiden DNS-Stränge, den kodogenen Strang, ab. Welcher der beiden DNS-Stränge kodogener Strang ist, ist von DNS-Abschnitt zu DNS-Abschnitt verschieden.



Schematische Darstellung der Transkription des kodogenen DNS-Stranges in mRNS

Am kodogenen Strang werden nach dem Prinzip der komplementären Basenpaarung die notwendigen RNS-Bausteine, die durch den Zellstoffwechsel bereitgestellt werden und die entsprechenden Basen enthalten, zu einer Ribonukleotidkette verbunden (↗S. 145 u. 151). Die mRNS gleicht somit in der Basenzusammensetzung dem nichtkodogenen DNS-Strang, wobei allerdings T jeweils durch U ersetzt ist. Die Verknüpfung der Nukleotide zu Polynukleotiden wird ebenfalls von der RNS-Polymerase bewirkt. ①②

Die RNS-Polymerase wandert nach Beginn der RNS-Synthese die DNS-Doppelhelix entlang; sie löst dabei die Wasserstoffbrücken weiterer Basenpaare und bewirkt die Fortsetzung der RNS-Synthese.

Die RNS wird vom eigenen 5′- zum 3′-Ende synthetisiert. Mit dem Weiterwandern der RNS-Polymerase löst sich die mRNS vom kodogenen DNS-Strang, und die beiden DNS-Stränge vereinigen sich wieder. Die mRNS wandert aus dem Zellkern zu den Ribosomen im Zellplasma. ③

▶ *Die Transkription der genetischen Information wird durch RNS-Polymerase katalysiert. Beginn und Ende der Transkription werden durch Start- und Stoppkodone auf dem kodogenen DNS-Strang angewiesen.*

Durch die Umschreibung (Transkription) der genetischen Information von DNS in mRNS wird die Verlagerung der genetischen Information ermöglicht, ohne daß der primäre Informationsträger, die DNS, den Zellkern verlassen muß und dadurch verstärkt der Gefahr der Veränderung ausgesetzt wäre.

Die Transkription der genetischen Information in mRNS ermöglicht auch die Übertragung einzelner Teilstücke der Gesamtinformation, denn je nach Entwicklungszustand des Individuums und entsprechend seiner Umwelt werden zu jedem Zeitpunkt nur bestimmte und nicht alle möglichen Eiweiße benötigt.

Daher ist die in der DNS gespeicherte genetische Information keine funktionell zusammenhängende Einheit, sondern besteht aus vielen kleinen Untereinheiten, den Erbanlagen oder Genen. Diese umfassen jeweils einen DNS-Bereich von durchschnittlich 1 000 Nukleotidpaaren. An diesen Genen werden, voneinander weitgehend unabhängig, mRNS-Moleküle gebildet, die nur deren Information übertragen, wodurch eine der Voraussetzungen für die zeitliche Steuerung der Stoffwechsel- und Entwicklungsprozesse der Zelle beziehungsweise des Individuums gegeben ist.

Das entstandene mRNS-Molekül enthält die Information für die Aminosäuresequenz eines bestimmten Eiweißes, wenn Start- und Stoppsignal der Transkription mit dem Anfang und dem Ende eines Gens identisch sind. Das mRNS-Molekül kann aber auch die Information für die Bildung mehrerer Eiweiße enthalten, wenn das Transkriptions-Stoppsignal nicht am Ende des ersten abgelesenen Gens, sondern erst am Ende eines der folgenden Gene liegt.

▶ *Die von der RNS-Polymerase abgelesene Transkriptionseinheit kann ein Gen oder mehrere Gene umfassen.*

Bei einigen Organismen, deren primärer Informationsträger einsträngige RNS ist, kann diese direkt als mRNS dienen, bei anderen wird zunächst ein komplementärer RNS- oder DNS-Strang gebildet und dieser als Matrize für die Synthese weiterer RNS-Ketten verwendet. ④

① Vergleichen Sie DNS-Replikation und Transkription miteinander!
② Nennen Sie die Base, die in der mRNS anstelle von Thymin auftritt!
③ Benennen Sie das Enzym, das die Transkription der genetischen Information regelt, und beschreiben Sie seine Wirkungsweise!
④ In einer mRNS mit der Basensequenz ... UCU ACC AAA UUG AAU ... wird durch Mutation das 4. Triplett in UAG verwandelt. Erläutern Sie die Folgen!

Translation der genetischen Information

▶ *Im Prozeß der Translation wird die genetische Information aus der Basensequenz der mRNS in die Aminosäuresequenz der Eiweiße übersetzt.*

Die Translation der genetischen Information bei der Eiweißsynthese findet an den Ribosomen statt (↗ S. 15), die sich an die mRNS-Moleküle anlagern, nachdem diese den Zellkern verlassen haben.

Die für die Eiweißsynthesen benötigen Aminosäuren werden durch Transport-RNS (transfer-RNS, tRNS) zum Ribosom transportiert. Für jede Aminosäure steht mindestens eine spezifische tRNS-Art zur Verfügung, andererseits trägt eine bestimmte tRNS immer die gleiche Aminosäure.

■ Serin wird nur von serinspezifischer tRNS übertragen, leuzinspezifische tRNS überträgt nur Leuzin.

Die Aminosäuren stammen aus dem Stoffwechsel der Zelle oder werden dem Organismus von außen zugeführt, ihre Bindung an das tRNS-Ende wird durch ein für jede Aminosäure spezifisches Enzym vermittelt.

▶ *tRNS-Moleküle verbinden sich mit Aminosäuren und transportieren diese zu den Ribosomen. Für jede Aminosäure gibt es mindestens eine spezifische tRNS.*

tRNS wird ebenso wie mRNS an bestimmten Abschnitten der DNS, bestimmten Genen, im Rahmen eines Transkriptionsprozesses linear synthetisiert. Jedes tRNS-Molekül weist eine Basenzusammensetzung und -sequenz auf, die dem DNS-Abschnitt des Gens, an dem es gebildet wird, komplementär ist. ①

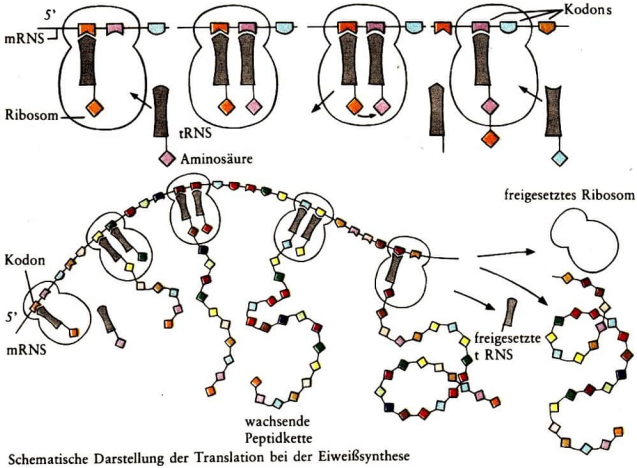
▶ *Ein bestimmtes Basentriplett der tRNS ist Antikodon zum mRNS-Kodon. Die Verknüpfung der Aminosäuren zum Polypeptid geschieht in der durch die Basensequenz der mRNS festgelegten Reihenfolge.*

Die Kodon-Antikodon-Verbindung geschieht wiederum nach dem Prinzip der komplementären Basenpaarung. Je drei aufeinanderfolgende Nukleotide der mRNS, ein Kodon, veranlassen die Anlagerung einer tRNS, die an einer bestimmten Stelle der Polynukleotidkette das dem Kodon entsprechende Antikodon enthält, das sind drei Nukleotide, die denen des Kodons komplementär sind.

Die Translation der genetischen Information erfolgt vom 5′-Ende der mRNS zu ihrem 3′-Ende (↗ S. 145). Unter Kontrolle der einzelnen Kodons der mRNS wird dabei eine mit Aminosäure beladene tRNS nach der anderen an das die mRNS entlanggleitende Ribosom geführt und dort entladen, wobei die Aminosäuren durch Peptidbindung miteinander verknüpft werden. Dadurch wird die wachsende Polypeptidkette entsprechend der in der mRNS verschlüsselten genetischen Information Glied um Glied verlängert, bis das mRNS-Stoppkodon die Translation abbricht. Damit ist die Bildung der in bestimmter Weise zusammengesetzten Polypeptidkette, das spezifische Genprodukt, abgeschlossen. Das fertige Eiweiß, die letzte tRNS und das Ribosom werden freigesetzt. Ribosom und tRNS stehen damit für weitere Eiweißsynthesen wieder zur Verfügung. ②

▶ *Beginn und Beendigung der Translation werden durch Start- und Stoppkodons der mRNS angewiesen.*

① Beschreiben Sie die Bildung von mRNS- und tRNS-Molekülen!
② Erläutern Sie möglichst vollständig die Ihnen bekannten Wirkungsmechanismen, die den Einbau der jeweils richtigen Aminosäure bei der Eiweißsynthese regeln!
③ Erläutern Sie die Bedeutung von Ribosomen im Stoffwechsel der Zelle!
④ Charakterisieren Sie unter Berücksichtigung molekularbiologischer Erkenntnisse den Begriff Gen!



Schematische Darstellung der Translation bei der Eiweißsynthese

Die Effektivität der Eiweißsynthese wird dadurch erhöht, daß sich mit jedem mRNS-Molekül mehrere Ribosomen verbinden. Jedes dieser Ribosomen bildet, indem es — eines nach dem anderen — die mRNS entlangwandert, das gleiche Eiweißmolekül. Sobald das erste Ribosom den Startsignalbereich der mRNS verlassen hat, kann das nächste Ribosom angelagert werden. Es rückt dem ersten nach, ein weiteres kann angelagert werden und so fort. An einem Molekül mRNS können so nacheinander mehrere identische Eiweißmoleküle synthetisiert werden. ③

Umfaßt das mRNS-Molekül die Information mehrerer aufeinanderfolgender Gene, muß durch entsprechende Signale auf der mRNS die Verknüpfung der jeweils letzten Aminosäure eines Peptids mit der ersten Aminosäure des folgenden Peptids verhindert werden. Dies geschieht jeweils durch ein nonsense-Kodon, das die Beendigung der Synthese des einen Eiweißes bestimmt, und ein Startkodon, das den Beginn der Synthese des nächsten Eiweißes induziert.

Die Zusammensetzung jedes Eiweißes ist prinzipiell durch einen dafür spezifischen Abschnitt der DNS, durch ein Gen, bedingt. Anzahl und Reihenfolge der im Polypeptid, dem Genprodukt, enthaltenen Aminosäuren sind durch die Nukleotid- beziehungsweise Basensequenz des Gens festgelegt. ④

▶ *Transkription und Translation sind die beiden Teilschritte bei der Realisierung der im Gen fixierten genetischen Information. Dabei wird die Reihenfolge der Aminosäuren in spezifischen Eiweißen festgelegt.*

Funktion, Wirksamkeit und Spezifität eines Eiweißes hängen von seiner Struktur ab.

Die Aminosäuresequenz einer Polypeptidkette ist die Primärstruktur. Die Bildung von Sekundär-, Tertiär- und gegebenenfalls Quartärstrukturen hängt von der Primärstruktur ab, sie erfolgt spontan während der Translation. ①②

■ Das Globinmolekül im Hämoglobin des Menschen ist aus vier Polypeptidketten zusammengesetzt, von denen je zwei gleich sind.

Regulierung der Eiweißsynthese. Nicht zu jedem Zeitpunkt seiner Entwicklung und nicht unter allen Umweltbedingungen benötigt eine Zelle alle Eiweiße, die aufgrund ihres genetischen Materials gebildet werden könnten. Bei mehrzelligen Organismen ist darüber hinaus der Bedarf von Zelle zu Zelle beziehungsweise von Gewebe zu Gewebe verschieden. Ein ordnungsgemäßer Ablauf der Lebensprozesse ist demzufolge nur gewährleistet, wenn die notwendigen Eiweiße zum richtigen Zeitpunkt in der benötigten Menge zur Verfügung gestellt werden können.

■ Bakterien synthetisieren bestimmte Wuchsstoffe normalerweise nur dann, wenn diese nicht im Nährmedium enthalten sind. Nach Zusatz dieser Substanzen zum Medium wird die Synthese dieser Stoffe eingestellt. Enzyme, die zum Abbau von Zuckern oder anderen Substanzen notwendig sind, werden andererseits nur dann gebildet, wenn der betreffende Nährstoff wirklich im Medium vorhanden ist.

Es müssen Mechanismen existieren, die regulativ die Synthese der Eiweiße beeinflussen.

▶ *Die Regulation der Eiweißsynthese ist durch Beeinflussung der verschiedenen Phasen der Transkription und Translation möglich.* ③

Es ist nachgewiesen, daß zugehörig zu den Genen, die die Information für die Eiweißsynthese beinhalten und damit Strukturgene sind, auch Kontrollgene existieren, die die Aktivität der Strukturgene steuern.

Die verschiedenen Funktionen einer Zelle beziehungsweise eines Organismus (■ Stoffwechselvorgänge, Zellteilungsaktivität, Differenzierung) unterliegen damit Regelmechanismen, die die Aktivität der verschiedenen Gene koordiniert steuern.

Herausragendstes Regulationsphänomen bei vielzelligen Organismen ist die Differenzierung von Zellen unterschiedlichster Struktur und Funktion, obwohl alle Zellen eines Individuums den gleichen Genbestand aufweisen. Der Differenzierung muß ein Mechanismus zugrunde liegen, der jeweils nur einen bestimmten Teil der genetischen Information in Merkmalsbildungen umsetzt beziehungsweise den anderen Teil blockiert. Die Kenntnis von diesen Prozessen ist noch verschwindend gering, selbst die Hypothesen- und Modellbildung stehen noch am Anfang.

Nervenzelle

Knorpelzellen

Drüsenzellen

Bedeutung der Eiweiße. Eiweiße sind als Struktureiweiße die wichtigsten Bestandteile zellulärer Strukturen (↗S. 6 bis S. 18, ↗S. 88 f.); als Enzymeiweiße steuern sie die im Organismus ablaufenden biochemischen Reaktionen; die Ausbildung der Merkmale ist daher auf das engste mit der Eiweißsynthese verknüpft. ④⑤

■ Bei einem erwachsenen Menschen werden täglich 90 g bis 100 g Eiweiße neugebildet, wovon 8 g auf Hämoglobin, 23 g auf Lebereiweiß, 32 g auf Muskel- und Hauteiweiß, 22 g auf Albumine und Globuline im Blutplasma und der Rest auf andere Eiweiße entfallen.

Das zentrale Schema der Realisierung der Erbinformation beschreibt in der Form DNS—RNS—Eiweiß aber nur den ersten Schritt zur Ausbildung von Merkmalen, der als „primäre Genwirkung" bezeichnet wird: Die Nukleotidsequenz der DNS ist die Grundlage für die Primärstruktur der Eiweiße, von der unmittelbar ihre Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur abhängen. Der auf die primäre Genwirkung folgende Abschnitt der Entwicklung der Merkmale ist durch vielfache Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Erbanlagen beziehungsweise deren Produkten und den Umweltverhältnissen gekennzeichnet. Die Ausbildung der komplexen Strukturen der Zellen sowie ihrer Funktionen erfolgt auf der Grundlage der Struktur bestimmter Eiweiße, aber durch deren Zusammenwirken mit verschiedensten anderen inneren und äußeren Faktoren. Der Phänotyp des Individuums wiederum ist nicht allein die Summe seiner Zellen, sondern resultiert aus deren Zusammenwirken unter dem Einfluß der Umwelt (↗S. 137).

▶ *Der Phänotyp ist primär durch die der genetischen Information entsprechende Eiweißstruktur bedingt, seine Ausgestaltung erfolgt durch vielfältige Wechselwirkungen von Genen, Genprodukten und Umwelt.*

Strukturbildende Eiweiße oder Struktureiweiße sind Eiweiße, aus denen viele Zellstrukturen aufgebaut sind. Gleichzeitig erfüllen die meisten davon wichtige Stoffwechselfunktionen. ⑥

■ Das in den roten Blutkörperchen befindliche Hämoglobin übernimmt den Sauerstofftransport im Blut.

Enzymeiweiße oder Enzyme sind Eiweiße mit spezifischer Tertiärstruktur, die als Biokatalysatoren an biochemischen Umsetzungen im Organismus beteiligt sind. Über die Steuerung vieler Stoffwechselvorgänge greifen sie unmittelbar in die Ausbildung der Merkmale ein. In den meisten Fällen wirken sie spezifisch, sie sind auf eine bestimmte chemische Reaktion und auf einen bestimmten Stoff oder eine Stoffgruppe eingestellt (↗S. 29 bis S. 33).

Die Bedeutung eines „Enzym-Gens" für die Merkmalsbildung kann schematisch folgendermaßen dargestellt werden: Am Muster des Gens wird eine mRNS gebildet, die die Aminosäuresequenz des Eiweißes bestimmt, das dann als Enzym wirkt. Das Gen enthält nicht die genetische Information für das Merkmal selbst, sondern nur für das Enzym, das dann durch Umwandlung bestimmter Stoffwechselprodukte das eigentliche Merkmal entstehen läßt.

① Erarbeiten Sie ein Schema, das von der DNS ausgehend die Realisierung der genetischen Information bei der Eiweißsynthese darstellt!

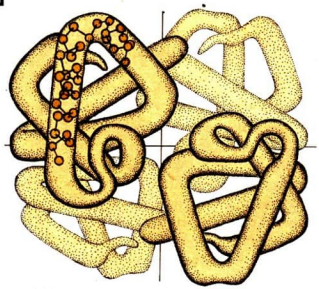
② Erläutern Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse aus dem Chemieunterricht die Strukturbildung von Eiweißen!

③ Erläutern Sie den Unterschied zwischen Transkription und Translation!

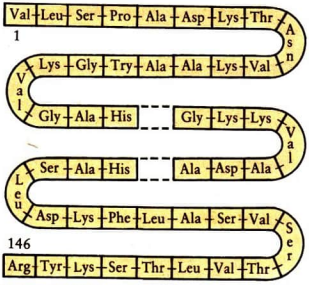
④ Beschreiben Sie die Struktur von Grundplasma und Membransystemen der Zelle! Erläutern Sie den Zusammenhang von Struktur und Funktion dieser Bestandteile!

⑤ Beschreiben Sie die Struktur von Enzymen, und erläutern Sie deren Wirkungsweise am Beispiel eines Verdauungsprozesses!

⑥ Erläutern Sie unter diesem Aspekt Bau und Funktion von Chloroplasten und von Mitochondrien!



Modell der Globinketten des menschlichen Hämoglobins



Aminosäurefolge einer α-Kette des menschlichen Hämoglobins (Ausschnitt)

Damit ist der Einwirkung anderer Faktoren, auch äußerer, bei der Merkmalsausbildung Raum gegeben. Oft wirken an der Merkmalsausbildung verschiedene Enzyme und damit verschiedene Gene mit. Auf diese Weise werden die meisten der für den Stoffwechsel notwendigen Verbindungen synthetisiert oder abgebaut und Merkmale ausgebildet, die für das Individuum beziehungsweise die Art kennzeichnend sind.

Die Einteilung der Eiweiße in Struktureiweiße und Enzymeiweiße ist nur eine von vielen Möglichkeiten, und zwar nur eine sehr grobe. Struktureiweiße können gleichzeitig katalytische Eigenschaften aufweisen, Enzymeiweiße auch strukturbildende Funktionen ausüben.

Die genetische Information wird durch die Synthese von Eiweißen realisiert, die Grundlage für die Ausbildung der Merkmale sind. Jedes Eiweiß ist durch Art, Anzahl und Reihenfolge seiner Aminosäuren charaktersiert. Die Reihenfolge der Aminosäuren ist durch den genetischen Kode festgelegt.

Der genetische Kode besteht aus Folgen von jeweils drei Nukleotiden, die je eine spezifische Aminosäure kodieren; der genetische Kode ist ein spezifischer, hochgradig degenerierter, nicht überlappender, kommafreier, universeller Triplettkode.

Die Realisierung der genetischen Information läuft in zwei Schritten ab:
— bei der Transkription wird an der DNS durch komplementäre Basenpaarung mRNS gebildet und dadurch die genetische Information der DNS in mRNS umgeschrieben;
— bei der Translation wird an den Ribosomen die Basensequenz der mRNS in die Aminosäurefolge der Eiweiße übersetzt.
Die Aminosäuren werden durch spezifische tRNS zu den Ribosomen transportiert.

Eiweiße sind als Enzym- und Struktureiweiße Regulatoren biochemischer Reaktionen in den Zellen und wichtigste Bestandteile der Zellstrukturen; sie sind die molekulare Grundlage des Phänotyps, dessen Ausgestaltung durch vielfältige Wechselwirkungen von Genen, Genprodukten und Umwelt erfolgt.

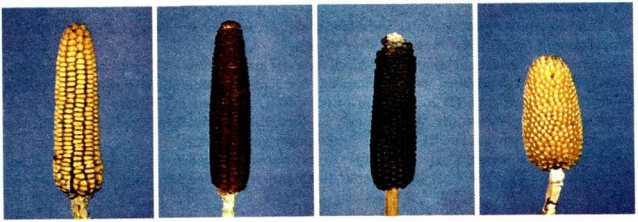
Veränderungen der genetischen Information durch Mutationen

Hunderassen (■ Rottweiler, Königspudel)

Die identische Replikation der DNS bedingt über Generationen hinweg die Weitergabe von unveränderten Erbinformationen, die lediglich durch Rekombination in verschiedenartiger Zusammenstellung vorkommen oder durch bestimmte Umwelteinflüsse in ihrer Auswirkung auf den Phänotyp modifiziert werden können. Rekombination und Modifikation allein ergeben aber keine ausreichende Grundlage zur Erklärung der Formenvielfalt, in der die lebende Natur existiert. Zu den maßgeblichen Ursachen für das Entstehen immer neuer Arten gehören die Veränderungen der genetischen Information, die Mutationen. ①②

Mutationen. Mutationen sind Veränderungen der genetischen Information. Spontane Mutationen erfolgen ohne äußerlich sichtbare Ursache, vermutlich aufgrund von verschiedenen Stoffwechselstörungen. Induzierte Mutationen erfolgen durch das nachweisbare Einwirken bestimmter Faktoren oder werden durch den Menschen bewußt hervorgerufen.

Die die Mutation verursachenden Faktoren werden als Mutagene, das in seiner genetischen Information veränderte Individuum als Mutante bezeichnet.



Durch Mutationen entstandene unterschiedliche Maissorten

① Erläutern Sie den Begriff Modifikation!

② Können somatische Mutationen (↗ S. 139) Ursache für das Entstehen neuer Arten sein? Begründen Sie Ihre Meinung!

Normalform von Tomate und Mutante mit ganzrandigen Blättern

Wildtyp und Flügelmutanten der Fruchtfliege *Drosophila*

► *Die Veränderbarkeit der genetischen Information ist ein Wesensmerkmal des Lebens.*

Die Veränderbarkeit der genetischen Information ermöglicht im Zusammenhang mit Ausleseprozessen die Anpassung der Organismen an veränderte Umweltbedingungen und damit den Fortbestand des Lebens. Sie ist eine entscheidende Voraussetzung für die Evolution der Organismen. ①

► *Die durch Mutationen bedingte Variabilität der Art ist eine der Voraussetzungen für die Evolution und für die Züchtung von Organismen.*

Durch Mutationen beziehungsweise durch Rekombination können Organismen entstehen, deren Merkmale gegenüber den Merkmalen der Ausgangsindividuen für den Menschen spürbar nützlicher sind (■ Ausbildung bitterstofffreier Samen bei Süßlupinen gegenüber bitterstoffhaltigen Samen der Wildformen). So veränderte Individuen werden vom Züchter ausgelesen und weitervermehrt oder zu Kreuzungen verwendet. ②

Die wesentlich weniger zeitaufwendige Mutationszüchtung beruht im wesentlichen auf experimentell ausgelösten, oft zu mehreren aufeinanderfolgenden Mutationen. So sind zahl-

① Begründen Sie die Aussage, daß Mutationen notwendig für den Fortbestand des Lebens sind!

② Berichten Sie anhand Ihrer Kenntnisse aus der Klasse 10 über Auslesezüchtung und Kreuzungszüchtung! Verwenden Sie Bio i Ü, Seite 251!

③ Werten Sie die durch Mutation entstandene Stummelflügeligkeit bei Insekten auf windexponierten Inseln!

reiche neue Kulturpflanzensorten mit höheren Erträgen (■ von Sojabohnen, Reis, Pfirsichen, Weizen, Gerste) sowie Hochleistungsstämme von antibiotikaproduzierenden Pilzen (■ Penizillin-Produzenten) durch induzierte Mutationen entstanden.

Der Wert der durch Mutation entstandenen Allele eines Gens ist nicht grundsätzlich als hoch oder gering zu bezeichnen. Er kann nur unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Umweltbedingungen eingeschätzt werden. Bei Änderung der Umwelt können sich Allele, die vorher ungünstige Auswirkungen auf Lebensfähigkeit beziehungsweise Leistungsfähigkeit hatten, günstig auswirken, und andere können Nachteile bringen. ③

■ In bestimmten Bakterienstämmen sind neben „Normalbakterien" auch einige wenige Bakterien mit spontan entstandenen Allelen, die Resistenz gegenüber bestimmten Arzneimitteln verursachen, vorhanden. Sie sind unter üblichen Bedingungen aufgrund bestimmter Nebenwirkungen oft benachteiligt. Bei Einsatz der entsprechenden Arzneimittel dagegen wird der größte Teil der Bakterien, die nichtresistenten, vernichtet, während sich die resistenten Mutanten ungehindert vermehren können. Nach länger wirkendem Einsatz dieser Arzneimittel sind alle Bakterien dieser Art resistent, das Arzneimittel wird unbrauchbar. Ähnliche Erscheinungen sind bei vielen tierischen Schädlingen gegenüber chemischen Schädlingsbekämpfungsmitteln zu beobachten.

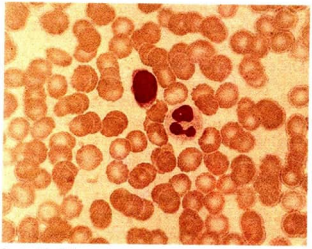
Solche Situationen erfordern ständig die Neuentwicklung von Bekämpfungsmitteln und -methoden — eine komplizierte und kostenaufwendige Aufgabe.

■ Die meisten Menschen unserer Breiten besitzen in ihren roten Blutkörperchen das sauerstoffbindende Hämoglobin A, sie sind homozygot Hb^AHb^A. Enthalten die roten Blutkörperchen statt dessen das durch Mutation entstandene Hämoglobin S, ist diese lebensnotwendige Sauerstoffbindung nicht voll möglich; homozygote Personen (Hb^SHB^S) erkranken an Sichelzellanämie. Auch heterozygote Personen (Hb^AHb^S), die nur in einem Teil ihrer roten Blutkörperchen das Sichelzellhämoglobin S aufweisen, sind in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt.

In malariaverseuchten Gebieten der Erde ist diese Benachteiligung der Heterozygoten aber bei weitem dadurch aufgehoben, daß sie eine größere Resistenz gegenüber Malaria-Erregern besitzen. Sichelzell-Heterozygote sind daher — trotz der Möglichkeit, daß ein Teil der

Penizillinkultur

Antibiotische Wirkung von Penizillin in Bakterienkulturen



Rote Blutkörperchen

Sichelzellblutkörperchen

Nachkommen homozygot Hb^SHb^S wird und an Sichelzellanämie erkrankt — den Homozygoten Hb^AHb^A gegenüber im Vorteil.

■ Die Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus) beruht auf Allelen, die die Insulinproduktion hemmen und damit die Blutzuckerkonzentration fördern. In Bevölkerungen mit knapper und unregelmäßiger Nahrungsaufnahme stellen Erbanlagen, die die Blutzuckerkonzentration auf einem bestimmten Niveau belassen, einen Selektionsvorteil dar: Die Ausbreitung der die Insulinproduktion hemmenden Allele wird begünstigt. Nach der — unter genetischen Gesichtspunkten betrachtet — relativ raschen Änderung der Lebensbedingungen einer Reihe von Völkern führen die gleichen Erbanlagen, die unseren Vorfahren in Hungerzeiten das Überleben ermöglichten, nun zur Zuckerkrankheit: Die im Durchschnitt regelmäßige, reichliche bis übermäßige Ernährung (■ in entwickelten Industrieländern) bedingt bei relativ vielen Personen zu hohe Blutzuckerwerte und damit das Auftreten der Krankheit.

Bei weitem nicht alle Mutationen führen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit oder Überlebenschance. Die Anzahl der sich in einer bestimmten Umwelt positiv auswirkenden Mutationen ist verschwindend gering gegenüber der Anzahl der sich negativ auswirkenden Mutationen. Grund dafür ist, daß die heute vorhandenen Organismenarten durch die Jahrmillionen dauernde Auseinandersetzung mit der Umwelt so gut an diese angepaßt sind, daß die meisten der ungerichtet auftretenden Veränderungen der genetischen Information eine mehr oder weniger nachteilige Wirkung haben. Diese Feststellung trifft auch auf die Menschen zu. Deshalb ist besonderes Augenmerk darauf zu richten, daß sein genetisches Material vor der Einflußnahme von Mutagenen geschützt wird.

Mutagene. Seit der Entdeckung der mutagenen Wirkung von Röntgenstrahlen im Jahre 1927 wurde eine Vielzahl physikalischer und chemischer mutationsauslösender Faktoren bekannt. Eine Anzahl dieser Faktoren ist gleichzeitig krebserregend.

In einigen wenigen Fällen konnten bereits Teileinblicke in die Wirkungsmechanismen von Mutagenen gewonnen werden. Mutagene wirken indirekt über bestimmte chemische Reaktionen oder direkt auf den Feinbau der Gene oder Chromosomen beziehungsweise auf den Verlauf von Mitose- und Meioseprozessen ein. Manche dieser Faktoren wirken nur auf bestimmte Organismen oder Zellen oder nur in bestimmten Konzentrationen oder in Verbindung mit anderen Einflüssen.

■ Das Erkennen von Mutagenen, die für den Menschen schädigend sein können, ist durch die bei verschiedenen Organismenarten unterschiedliche Wirkungsweise dieser Stoffe sehr

Mutagene

physikalische Mutagene		chemische Mutagene
Röntgenstrahlen UV-Strahlen α-, β-, γ-Strahlen Neutronen	Kälteschock hohe Temperatur	Kolchizin, Nikotin, Koffein salpetrige Säure Hydroxylamin Senfgase Industrieabgase

erschwert. Zum möglichst schnellen Erkennen möglicher Mutagene werden als Testobjekte Organismen verwandt, die sich rasch vermehren (■ Bakterien, Bakteriophagen, Fruchtfliegen). Faktoren, die für diese Objekte mutagen sind, können aber beim Menschen harmlos sein, weil sie in seinem Organismus entgiftet werden; andererseits können Einflüsse oder Substanzen, die bei niederen Organismen unwirksam sind, dem Menschen Schaden zufügen, weil sie durch seinen Stoffwechsel in mutagene Wirkformen übergeführt werden. Eine effektive Mutagenitätsprüfung als Voraussetzung für das Erkennen und Ausschalten von Einflüssen oder Substanzen, die beim Menschen als Mutagene wirken, erfordert daher das Arbeiten mit Säugetieren oder zumindest mit in vitro kultivierten Säugetier- oder menschlichen Zellen.

Alle Organismen, auch der Mensch, sind verschiedensten natürlichen Mutagenen ausgesetzt. Darüber hinaus sind aber auch viele vom Menschen geschaffene Faktoren (■ verschiedene Arzneimittel, Strahlen für diagnostische oder therapeutische Zwecke, Genußgifte, Schädlingsbekämpfungsstoffe, Konservierungsmittel, Kosmetika) für bestimmte Testorganismen oder in bestimmten Konzentrationen mutagen. Da für die Mehrzahl dieser Stoffe noch unklar ist, ob sie auch beim Menschen erbgutverändernd sind, ist verantwortungsbewußtes Umgehen mit ihnen geboten.

Die Unterstützung des Kampfes gegen Anwendung und Erprobung von Kernwaffen, deren Einsatz eine zusätzliche Strahlenbelastung der Umwelt darstellt, sowie gegen den Einsatz chemischer Kampfstoffe sollte für alle Menschen selbstverständliche Pflicht sein.

Eine völlige Entfernung mutagener Stoffe aus der Umwelt des Menschen ist gegenwärtig nicht durchführbar. Es muß aber nach Wegen gesucht werden, möglichst viele der mutagenen Faktoren durch nicht mutationsauslösende zu ersetzen. Darüber hinaus müssen schon beim Konzipieren von neuen Produkten und Technologien solche Lösungen gefunden werden, die Produkte und Abprodukte für die Umwelt und den Menschen schadfrei machen. Sozialistische Produktionsverhältnisse bieten dabei günstige Voraussetzungen.

Mutationstypen

Die spontan entstehenden oder durch Mutagene induzierten Mutationen können in Gen-, Chromosomen- und Genommutationen unterteilt werden.

Genmutationen. Veränderungen der Nukleotidbasenfolge eines Gens sind Genmutationen.

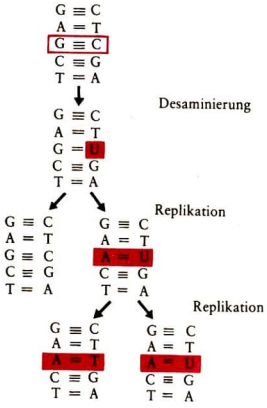
▶ *Genmutationen sind Austausche einzelner Basenpaare, Verluste oder Einfügungen einzelner Nukleotidpaare sowie Veränderungen, Verluste oder Einfügungen größerer Genabschnitte.*

Folgen dieser Prozesse sind Polypeptide, die aufgrund ihrer veränderten Aminosäuresequenz eine mehr oder weniger veränderte, eine völlig andersartige oder keine Aktivität aufweisen.

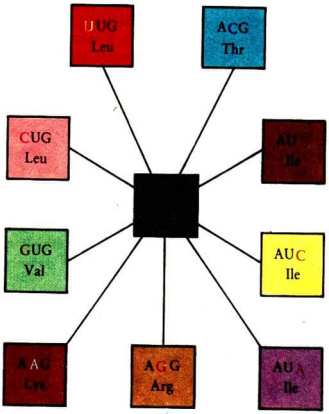
■ Das beim Menschen die Sichelzellanämie bedingende Hämoglobin S unterscheidet sich von normalem Hämoglobin A nur dadurch, daß an einer bestimmten Stelle anstelle von Glutaminsäure Valin eingebaut ist. Dieser Aminosäureaustausch ist vermutlich auf den Ersatz der zweiten Base im Glutaminsäurekodon GAA (oder GAG) durch U zurückzuführen; primär bedingt ist dieser Prozeß durch die Veränderung des DNS-Kodogens CTT oder CTC in CAT oder CAC.

Neben Hämoglobin S sind bisher mehr als 130 andere Hämoglobin-Varianten bekannt, die sich fast alle von normalem Hämoglobin nur durch eine einzige Aminosäure unterscheiden. ①

Von mehr als 2 000 Erkrankungen des Menschen ist bekannt, daß sie durch Mutationen einzelner Gene bedingt sind.



Veränderung eines G-C-Paares in ein A-T-Paar durch Umwandlung eines Zytosins in Urazil infolge von Desaminierung durch salpetrige Säure



Folgen des Austauschs einer Base im Methionin-Kodon AUG

Trotz vielfältiger Anstrengungen — gerade auch in den sozialistischen Staaten — ist die therapeutische Behandlung, die Linderung oder gar Heilung solcher Krankheiten gegenwärtig leider noch nicht generell möglich.

■ Die Phenylketonurie (PKU) ist eine der häufigsten angeborenen Stoffwechselerkrankungen; sie tritt bei Reinerbigkeit des rezessiven PKU-Allels auf. In der DDR wird unter etwa 9 000 Neugeborenen ein Kind mit PKU gefunden. Im Vordergrund des Krankheitsbildes steht bei unbehandelten Patienten bereits im ersten Lebensjahr durch Störung der Gehirnentwicklung und -funktion schwerer Schwachsinn. Die Kinder können zum Teil weder sitzen noch stehen oder gehen lernen. Viele Kinder bekommen Krampfanfälle und Hautekzeme; Haut, Haare und Iris sind durch Pigmentmangel aufgehellt. Die Lebenserwartung ist stark herabgesetzt.

Die Krankheitserscheinungen werden dadurch hervorgerufen, daß ein bestimmtes Gen, welches die Synthese des Enzyms Phenylalanin-Hydroxylase auslöst, fehlt.

Durch das Enzym Phenylalanin-Hydroxylase wird die mit der Nahrung aufgenommene Aminosäure Phenylalanin zu Tyrosin umgebaut. Da die bei PKU-Patienten vorhandenen beiden mutierten Allele aber kein genügend aktives Enzym induzieren können, kommt es zu einer Anhäufung von Phenylalanin und daraus zum Teil entstehenden abnormalen Phenylketonkörpern. Als Folge davon werden der Stoffwechsel der Nervenzellen sowie andere Körperfunktionen beeinträchtigt, so daß das Krankheitsbild entstehen kann.

Die Bezeichnung der Krankheit geht darauf zurück, daß Phenylketonkörper mit dem Harn (Urin) ausgeschieden und in diesem auch nachgewiesen werden können, was ebenso wie die erhöhte Phenylalaninkonzentration im Blut zum Erkennen der Erkrankung benutzt wird.

Werden PKU-Patienten von Geburt an durch phenylalaninfreie Kost ernährt, können sie sich normal entwickeln. In der DDR als einem der ersten Länder der Welt werden aus diesem Grunde seit 1967 alle Neugeborenen untersucht und die bereits nach wenigen Tagen ermittelten PKU-Patienten sofort mit der entsprechenden, industriell hergestellten Diät kostenlos versorgt.

Viele Erkrankungen des Menschen sind wie fast alle seine Normalmerkmale durch die Wirkung mehrerer bis vieler Gene bedingt, die auf verschiedenen Chromosomen lokalisiert sein können.

■ Eine durch die Veränderung mehrerer Gene bedingte Erkrankung ist die Zuckerkrankheit, bei der die Synthese von Insulin gestört ist, so daß der mit der Nahrung aufgenommene und ins Blut gelangte Zucker nur in ungenügendem Maße abgebaut wird. Die Behandlung erfolgt durch Zufuhr von Insulin sowie eine speziell eingestellte Diät, körperliche Tätigkeit und Verhinderung von Übergewichtigkeit.

Chromosomenmutationen. Chromosomenmutationen sind strukturelle Umbauten einzelner Chromosomen, die über Veränderungen an einem einzelnen Gen hinausgehen und zu Verlust, Gewinn oder Umlagerungen von Chromosomenabschnitten führen. Ihr Entstehen ist eventuell auf Einzel- oder Doppelstrangbrüche der DNS zurückzuführen, die durch verschiedene physikalische und chemische Faktoren ausgelöst und nicht korrekt repariert wurden. Ob darüber hinaus andere Prozesse an der Entstehung von Chromosomenmutationen beteiligt sind, kann vermutlich erst beurteilt werden, wenn weiterreichende Kenntnisse des Feinbaus der Chromosomen vorliegen. Gröbere Chromosomenveränderungen sind lichtmikroskopisch nachweisbar.

▶ *Chromosomenmutationen sind Verluste, Verlagerungen, Drehungen oder Verdopplungen von Chromosomenstücken.*

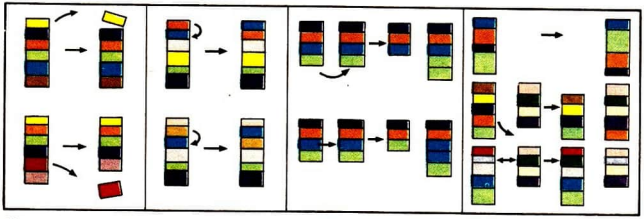
(1) Erörtern Sie die Folgen, die Genmutationen bei der Eiweißsynthese haben können! Berücksichtigen Sie dabei die Degeneration des genetischen Kodes!

Verluste von Chromosomenstücken, Deletionen, haben zur Folge, daß dem betroffenen Organismus bestimmte genetische Informationen und damit die entsprechenden Genprodukte fehlen. Deletionen führen daher häufig zu schweren Schädigungen oder Tod.

Die Verdopplung von Teilen eines Chromosoms, Duplikation, kann zu Schädigungen des Organismus führen sowie Schwierigkeiten bei der Chromosomenpaarung in der Meiose bereiten.

■ Eine der bekanntesten Chromosomenmutationen beim Menschen ist eine Deletion an einem Chromosom 5, die das sogenannte Katzenschrei-Syndrom verursacht: zu kleiner Kopf, Mißbildungen im Mund- und Kieferbereich sowie anderer Organe, starkes Zurückbleiben in der körperlichen Entwicklung, Idiotie, geringe Lebenserwartung. Die Bezeichnung des Syndroms ist auf ein charakteristisches, an das Wimmern junger Katzen erinnerndes Weinen im frühen Kindesalter zurückzuführen.

Haben beide Eltern eines solchen Kindes einen normalen Chromosomensatz, ist das betreffende Chromosomenstück vermutlich im Verlauf der Keimzellenentwicklung verlorengegangen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens weiterer gleichartig erkrankter Kinder in dieser Familie ist dann nicht wesentlich größer als in jeder anderen, bisher nicht derartig belasteten Familie. Treten dagegen im Chromosomenbild eines der Eltern Umlagerungen von Chromosomenstücken auf, entstehen im Verlaufe der Meiose Keimzellen mit unterschiedlichen Chromosomensätzen, die wiederum Mißbildungen bei einem Teil der Nachkommen hervorrufen können.



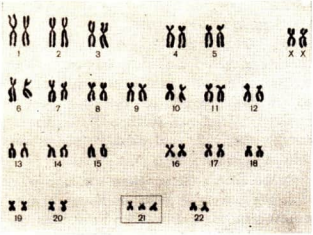
Chromosomenmutationen (von links: Verlust, Drehung, Verdopplung, Verlagerung)

Genommutationen. Das Vorhandensein von mehr als zwei Chromosomensätzen ist Polyploidie, die Vermehrung oder Verminderung eines Chromosomensatzes um ein oder mehrere Chromosomen (nicht ganze Sätze) ist Aneuploidie (↗ hintere innere Umschlagseite).

▶ *Genommutationen sind Veränderungen in der Anzahl der Chromosomen.*

Ursache der abweichenden Chromosomenanzahl können abnorm verlaufende Befruchtungsprozesse (■ Befruchtung einer Eizelle mit zwei Samenzellen) oder Störungen im Aufbau beziehungsweise der Funktionsweise des Spindelapparats während der Mitose und der Meiose sein. Solche Störungen können, wie alle Mutationen, spontan auftreten oder durch sogenannte „Spindelgifte" induziert werden.

■ Das aus Herbst-Zeitlosen gewonnene Kolchizin verhindert die Ausbildung des Spindelapparates bei der Kernteilung. Dadurch gelangen die in der Äquatorialplatte angeordneten Tochterchromosomen nicht zu den Polen; sie entspiralisieren sich, und es entsteht ein einziger Kern, allerdings mit nunmehr verdoppelter Chromosomenanzahl. Aus diploiden Zellen können so tetraploide Zellen, aus tetraploiden oktoploide Zellen entstehen.



Karyogramm einer Trisomie 21 beim Menschen

Trisomie 21 bei monozygotischen Zwillingen

Kreuzungen zwischen unterschiedlich geradzahligen Polyploiden können zu ungeradzahligen Polyploiden (■ 4n × 2n zu 3n) führen. ①

Polyploidie kann auch durch Gameten entstehen, die wegen einer die Reduktionsteilung verhindernden Meiosestörung den diploiden Chromosomensatz besitzen. Befruchtet eine solche Keimzelle eine normale haploide Keimzelle, entstehen Triploide. Verschmelzen zwei unreduzierte Keimzellen miteinander, entstehen Tetraploide. ②

Polyploide Organismen, überwiegend Pflanzen, sind züchterisch bedeutungsvoll. Sie haben durch das mehrfache Vorhandensein der Genome und damit auch der genetischen Information meist größere Zellkerne und größere Zellen als die entsprechenden Diploiden. Daraus resultiert eine Vergrößerung ihrer Organe, so daß sie großwüchsiger, ertragreicher und leistungsfähiger werden.

■ Weizensorten besitzen 2, 4 oder 6 Chromosomensätze; auch von Tabak und Kartoffeln werden neben diploiden Sorten (24 Chromosomen) tetra- und hexaploide (48 bzw. 72 Chromosomen) angebaut.

Polyploidie ist unter anderem auch bei Baumwolle, Zuckerrüben, Klee, Äpfeln, Birnen, Kirschen, Himbeeren, Erdbeeren und vielen Zierpflanzen bekannt.

Polyploidiestufen beim Weizen (von links: Einkorn, 2n; Emmer, 4n; Hartweizen, 4n; begrannter Saatweizen, 6n; unbegrannter Saatweizen, 6n)

① Entwickeln Sie zu dem angegebenen Beispiel der Triploidiebildung eine erläuternde Skizze!
② Erläutern Sie die Begriffe haploid und diploid!

Insgesamt sind vermutlich mehr als 30 % aller höheren Pflanzen polyploid. In subarktischen und arktischen Bereichen beträgt ihr Anteil sogar mehr als 70 %.

Polyploidisierung ist auch eine der Ursachen der Neubildung von Arten nach Paarung bereits vorhandener unterschiedlicher Arten. In der Regel weisen die Nachkommen aus Kreuzungen zweier verschiedener Arten, sogenannte Bastarde, eine verringerte Fortpflanzungsfähigkeit, oft sogar Sterilität auf. Ursache dafür ist, daß aufgrund des Fehlens homologer Chromosomen Störungen in der Meiose auftreten. Wird bei solchen Bastarden der Chromosomenbestand spontan oder experimentell verdoppelt, sind diese Probleme meist beseitigt, da nun jedes Chromosom einen homologen Partner findet.

Beim Menschen kommt Polyploidie bei Lebendgeborenen äußerst selten vor, und wenn, dann nur in Mosaikform: Nur einzelne Körperbereiche weisen diese Genommutation auf.

Abweichungen in der Anzahl einzelner Chromosomen dagegen werden beim Menschen häufiger beobachtet. Sie führen bei ihm wie bei anderen Organismen meist zu starken Schädigungen.

Diese Genommutationen entstehen spontan oder induziert durch Verteilungsstörungen in der Mitose oder Meiose, wobei einzelne Chromosomen in das „falsche" Teilungsprodukt gelangen. Geschieht dies bei einer mitotischen Teilung, weisen alle auf diese Zelle zurückzuführenden Zellen den aneuploiden Chromosomensatz auf; das Individuum besitzt dann häufig neben Zellen mit dem normalen Chromosomensatz solche mit aneuploiden Sätzen, es weist ein Chromosomenmosaik auf. Erfolgt dagegen der Teilungsfehler bei einer meiotischen Teilung, können Nachkommen mit nur aneuploiden Zellen entstehen.

■ Eine der häufigsten Genommutationen beim Menschen ist die Trisomie 21, das dreifache Vorhandensein des Chromosoms 21 im diploiden Chromosomensatz. Sie entsteht in der Regel, wenn aufgrund eines meiotischen Teilungsfehlers die Ei- oder die Samenzelle zwei Chromosomen 21 (und damit 24 Chromosomen) enthält. Patienten mit diesem Chromosomensatz weisen das sogenannte Down-Syndrom auf. Sie haben neben verschiedenen äußeren Veränderungen meist Herzfehler, sie erkranken leicht an Infekten und leiden häufig an einer Blutkrankheit. Sie sind nicht oder nur bedingt bildungsfähig, aber meist liebenswert und ausgeglichen. Kinder mit Trisomie 21 werden etwa einmal unter 600 Neugeborenen gefunden; die Trisomie 21 ist damit eine der häufigsten Erbkrankheiten. Mit zunehmendem Lebensalter der Eltern, besonders etwa nach dem 38. Lebensjahr, steigt der Prozentsatz von Kindern mit dieser Fehlbildung deutlich an. Ursache für diese Erscheinung ist die mit dem Alter zunehmende Häufigkeit von Zellteilungsfehlern.

Wird in einer Familie ein Kind mit Trisomie 21 geboren und besitzen beide Eltern einen normalen Chromosomensatz, ist die Wahrscheinlichkeit, ein weiteres Kind mit dieser Anomalie zu bekommen, nicht wesentlich größer als bei gleichaltrigen Eltern, die noch kein derartig erkranktes Kind gezeugt haben. Bei einigen Patienten mit Down-Syndrom ist das dritte Chromosom 21 an ein anderes Chromosom angelagert. Es liegt keine „freie" Trisomie, sondern eine „Translokations"-Trisomie vor. Besitzen beide Eltern einen normalen Chromosomensatz, ist das Erkrankungsrisiko für nachfolgende Kinder nicht wesentlich größer als in bisher nicht betroffenen Familien. Ist jedoch bei einem der gesunden Eltern eines der beiden Chromosomen 21 einem anderen Chromosom angelagert („balanzierte Translokation"), wird das Erkrankungsrisiko für jedes Kind relativ groß: Ein zu erwartendes Kind weist mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % eine Translokations-Trisomie 21 und damit das Down-Syndrom auf; mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % fehlt ihm ein Chromosom 21, wodurch es nicht lebensfähig ist; mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % ist es genotypisch und phänotypisch normal; mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % Träger der balanzierten Translokation, aber phänotypisch normal. Tatsächlich ist das Risiko, ein Kind mit Translokations-Trisomie 21 zu bekommen, etwas kleiner, da ein Teil der Keimlinge mit abnormalen

Patient mit einem bestimmten genetisch bedingten Syndrom (rechts) und gleichaltriges normalentwickeltes Kind

Hand- und Fußmißbildungen, die bei bestimmten genetisch bedingten Syndromen, aber auch bei sonst gesunden Personen vorkommen können

Gegenwärtige Möglichkeiten der Diagnostik genetisch bedingter Erkrankungen des Keimlings vor Ablauf des 6. Schwangerschaftsmonats	
Indikationen	**Maßnahmen**
Chromosomenaberrationen bei bereits geborenen Kindern (oder abortierten Früchten), balanzierte Chromosomentranslokation bei einem Elter, höheres Alter der Eltern oder mehrfache Spontanaborte	Fruchtwasserentnahme und Chromosomenanalyse aus Fruchtwasserzellen
Bestimmte Stoffwechselerkrankungen (Eltern bzw. geborene Kinder erkrankt oder Eltern Anlageträger)	Biochemische/enzymatische Untersuchungen an Fruchtwasser und Fruchtwasserzellen
Bestimmte grobe äußere Fehlbildungen (Eltern bzw. geborene Kinder erkrankt oder Eltern Anlageträger)	Sichtbarmachen von Keimlingsgestalt und einigen Organen durch spezielle Ultraschall- und Röntgenverfahren, biochemische/enzymatische Untersuchungen von Fruchtwasser und -zellen
Bestimmte X-chromosomal bedingte Erkrankungen (Eltern bzw. geborene Kinder erkrankt oder Mutter Anlageträger)	Geschlechtsuntersuchung an Fruchtwasserzellen, bei Stoffwechselerkrankungen oder groben äußeren Fehlbildungen s. o.
Aus dem Keimlingsblut diagnostizierbare Erkrankungen (Eltern bzw. geborene Kinder erkrankt oder Eltern Anlageträger)	Betrachtung des Keimlings durch Spezialspiegelung innerhalb der Fruchthülle und Blutentnahme aus Gefäßen des kindlichen Plazentaanteils

Chromosomensätzen bereits auf frühen Stadien der Keimlingsentwicklung stirbt und außerdem bereits Keimzellen mit abnormalen Chromosomensätzen nicht in der theoretisch zu erwartenden Häufigkeit zur Befruchtung gelangen. Trotzdem ist das Risiko so groß, daß eine vorgeburtliche Chromosomenuntersuchung vorgenommen werden sollte. Sie erfolgt durch Untersuchung der Chromosomen von Fruchtwasserzellen, die mittels einer durch die Bauchdecken der Mutter in die Fruchtblase eingeführten Kanüle entnommen werden: Wird dabei eine Trisomie 21 (oder eine andere Fehlbildung) nachgewiesen, kann zu frühzeitigem Schwangerschaftsabbruch geraten werden. Stellt sich andererseits heraus, daß der Keimling gesund ist, kann der Familie die Sorge genommen werden. ① ②

▶ Mutationen sind Veränderungen der genetischen Information, sie bilden eine der Grundlagen für die Formenvielfalt in der lebenden Natur. Mutationen können spontan entstehen oder durch innere und äußere Einflüsse (Mutagene) auf das genetische Material ausgelöst werden. Sie haben oft negative Auswirkungen, mutagene Stoffe (■ Strahlen) sind deshalb nur mit großem Verantwortungsbewußtsein anzuwenden.

Positive Auswirkungen von Mutationen (■ erhöhte Leistungsfähigkeit) werden in der Tier- und Pflanzenzüchtung ausgenutzt.

Mutationen können einzelne Gene betreffen (Genmutationen) und im Austausch, Verlust oder Einfügen von Nukleotidpaaren oder größerer Genabschnitte bestehen; sie können Chromosomen betreffen (Chromosomenmutationen) und in Verlust, Verdoppelung oder Verlagerung von Chromosomenstücken bestehen; sie können den Chromosomensatz betreffen (Genommutationen) und in der Vervielfachung des Chromosomensatzes (Polyploidie) oder in der Zunahme oder Verminderung um einzelne Chromosomen (Aneuploidie) bestehen.

Zu den durch Mutationen hervorgerufenen Krankheiten des Menschen gehören PKU, Diabetes mellitus, Trisomie 21.

① Stellen Sie tabellarisch zusammen: Ihnen bekannte genetisch bedingte Krankheiten — den sie verursachenden genetischen Defekt — Möglichkeiten der Verhinderung oder Einschränkung der Symptome!

② Werten Sie die therapeutischen und vorbeugenden Maßnahmen, die in der DDR zur Einschränkung von Erbkrankheiten durchgeführt werden!

Anwendung der Erkenntnisse genetischer Forschung

Durch Mutation entstandene Kulturpflanze (■ Süßlupine)

Durch Züchtung entstandene kurzhalmige Weizensorte

Die bewußte Ausnutzung der Erkenntnisse genetischer Forschung ist für viele Lebensbereiche (■ Medizin, Landwirtschaft) von grundlegender Bedeutung. Eine immer stärkere Spezialisierung in der Genetik und eine zunehmend stärkere Verflechtung mit anderen Wissensgebieten (■ Biochemie) erleichtert und ermöglicht die Gewinnung neuer Erkenntnisse, besonders über genetische Vorgänge im molekularen Bereich.

■ Die meisten der für den Genetiker wichtigen Merkmale der Organismen werden durch mehrere Gene bedingt, sie sind stark von der Umwelt abhängig und oft schwer zu messen. Die Auswertung von biostatistischem Material gewährt Einblick in die bei solchen Merkmalen mathematisch nicht vorherberechenbare Weitergabe genetischer Information und deren Realisierung unter speziellen Umweltwirkungen.

■ Struktur, Biosynthese und Funktion von Nukleinsäuren und Proteinen — Stoffe, die von grundlegender Bedeutung für die Vererbung sind — sind Gegenstand eng an die Biochemie geknüpfter molekulargenetischer Forschungen.

■ Physikalisch faßbare Wechselwirkungen innerhalb lebender Systeme sowie zwischen diesen und ihrer Umwelt (■ Funktion biologischer Makromoleküle, Transportprozesse in Zellen, Strahlungseinfluß auf biologische Objekte) werden durch die Anwendung biophysikalischer Forschungsmethoden erfaßt.

Die enge Zusammenarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Wissenschaftsdisziplinen bei der Erforschung genetischer Probleme hat in den letzten Jahren zu bedeutenden Ergebnissen geführt. Es ist heute möglich, Kerne aus Körperzellen in entkernte Eizellen zu übertragen. Es ist gelungen, auf enzymatischem oder chemischem Wege DNS-Abschnitte mit bestimmten genetischen Informationen zu isolieren und sogar solche DNS-Abschnitte zu synthetisieren. Es können mit relativ einfachen Mitteln Gene beliebiger Organismen miteinander vereinigt und diese neukombinierte DNS anschließend wieder in eine Zelle übertragen werden.

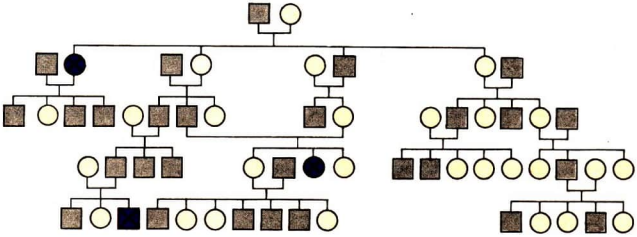
■ Die DNS kann mit spezifischen Enzymen an ganz bestimmten Stellen gespalten werden. Ein solches Enzym spaltet an der Basenfolge .....GAATTC.....
.....CTTAAG..... zwischen G und A.
Dadurch entstehen DNS-Fragmente mit überlappenden Enden:
.....G AATTC.....
und
.....CTTAA G....
Da diese Spaltung bei beliebigen Organismenarten DNS-Fragmente mit gleichen überlappenden Enden liefert, können DNS-Stücke unterschiedlicher Herkunft miteinander verbunden werden.

So ist es gelungen, in Bakterien Gene einzuschleusen, die die Insulinproduktion bedingen. Es scheint dadurch möglich zu werden, das für die Behandlung von Diabetikern benötigte Insulin industriell in großen Bakterienkulturen synthetisieren zu lassen. Eventuell kann auch über den Einbau von Genen für die Synthese von Phenylalanin-Hydroxylase in nicht krankheitserregende Viren und deren Verabreichung an PKU-Patienten das Auftreten der Krankheitssymptome verhindert werden.

Die in der genetischen Forschung erzielten Ergebnisse gewinnen zunehmend Bedeutung bei der Behandlung, Heilung und besonders Verhütung von genetisch bedingten oder mitbedingten Erkrankungen (■ durch Mutationsprophylaxe, ↗S. 177).

Der größte Teil solcher Erkrankungen ist auf die Vermehrung und Weitergabe von in der Familie schon vorhandenen Defektgenen zurückzuführen. Das dadurch möglich werdende Leid kann in vielen Fällen durch eine humangenetische Beratung verhindert werden. In der DDR wurde 1974 im Auftrag des Ministeriums für Gesundheitswesen begonnen, humangenetische Beratungsstellen aufzubauen. Die DDR ist damit das erste Land, in dem ein koordinierter humangenetischer Beratungsdienst mit einer einheitlichen Konzeption entsteht. Damit hat die DDR auf der Grundlage des elementaren Bedürfnisses aller Menschen nach Gesundheit und Leistungsfähigkeit das Recht aller Bürger auf einen umfassenden Gesundheitsschutz auch in dieser Hinsicht nicht nur verfassungsmäßig garantiert, sondern auch in der Praxis verwirklicht.

Die Beratungsstellen haben in erster Linie die Aufgabe, alle Personen, für deren Nachkommen ein hohes Risiko besteht, an einem genetisch bedingten Leiden zu erkranken, auf ihren Wunsch hin wissenschaftlich fundiert aufzuklären und eine dem derzeitigen Wissensstand entsprechende Entscheidungshilfe für ihre Familienplanung zu geben. In der Mehrzahl der Fälle können Eltern, die befürchten, Kinder mit genetisch bedingten Erkrankungen zu bekommen, von ihrer Furcht befreit werden. Ist andererseits die Furcht nicht unbegründet, kann der Zeugung oder gegebenenfalls der Geburt solcher Kinder vorgebeugt werden. In vielen Fällen kann sogar entsprechend belasteten Eltern geholfen werden, dennoch zu gesunden Kindern zu kommen. Eine weitere Aufgabe der Beratungsstellen besteht darin, bereits geborene Personen mit genetisch bedingten Erkrankungen einer umfassenden ärztlichen Betreuung zuzuführen und auf die Berufswahl und Berufsausübung solcher Personen Einfluß zu nehmen, um sie vor Mißerfolgen möglichst zu bewahren.



Familienstammbaum mit Patienten (violett), deren Erkrankung monogen bedingt ist und einem autosomal-rezessiven Erbgang folgt: Die Patienten sind homozygot für das die Krankheit bedingende rezessive Allel, ihre Eltern sind jeweils heterozygot

► *Die wichtigsten Untersuchungsmethoden zur Vorbereitung der humangenetischen Beratung sind die Stammbaumanalyse, Heterozygotenteste, die empirische Erbprognose, Chromosomenanalysen und vorgeburtliche Untersuchungen.*

■ Bei humangenetischen Beratungen ist oft zu klären, ob die phänotypisch gesunden Eltern Träger rezessiver Anlagen sind, die im homozygoten Zustand zur Erkrankung führen. Ein solcher Heterozygotentest wird beispielsweise in Familien mit PKU angewendet.

Eine bedeutende Rolle spielt die Genetik in der Landwirtschaft. Die Anwendung genetischer Erkenntnisse kann wesentlich zur Steigerung der Erträge in der Tier- und Pflanzenproduktion beitragen; sie kann damit — besonders unter nichtkapitalistischen Produktionsbedingungen — auch bei ständig zunehmenden Bevölkerungsgrößen die ausreichende Versorgung aller Menschen mit Nahrungsmitteln entscheidend beeinflussen.

Auch in der DDR ist eine der wichtigsten Aufgaben der Genetik die Schaffung von Grundlagen für die Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion, um die Bevölkerung ausreichend und bedarfsgerecht mit Nahrungsmitteln sowie mit Konsumgütern zu versorgen, deren Grundlage pflanzliche und tierische Rohstoffe sind.

Eine Möglichkeit, höhere Erträge zu erreichen, ist die Verbesserung der Umweltbedingungen. Durch die Schaffung geeigneter Pflanzenbau- und Tierhaltungsbedingungen können die durch das gegenwärtig bereits vorhandene genetische Material der Kulturpflanzen und Nutztiere gegebenen Möglichkeiten effektiver genutzt werden.

Der wichtigste Anwendungsbereich der Genetik in der Landwirtschaft ist gegenwärtig die Züchtung. Sie hat das Ziel, die genetische Konstitution unserer Kulturpflanzen und Nutztiere zu verbessern. Durch Auslese und Kreuzung können genotypisch neue Kombinationen gefunden werden, die für übliche Umweltbedingungen und Bedürfnisse besser geeignet sind oder sogar die Ausnutzung ganz neuer Umwelten erlauben.

► *Züchtung ist die bewußte Veränderung von Pflanzen- und Tiermerkmalen durch den Menschen entsprechend den gesellschaftlichen Bedürfnissen beziehungsweise den individuellen Wünschen.*

Zuchtziele sind Erhöhung der Ertrags- und Leistungsfähigkeit, Qualitätsverbesserung, Ertragssicherheit, Standortanpassung, Widerstandsfähigkeit und Eignung für maschinelle Bearbeitung beziehungsweise industriemäßige Produktion. Methoden der Züchtung sind Auslese, Kreuzung und Mutationsauslösung. ①

Bei einigen Kreuzungen tritt in der F_1-Generation eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit auf. Dieser Heterosiseffekt ist durch verschiedene sich günstig auswirkende elterliche Gene bedingt, die in der F_1-Generation vereinigt sind und nun gemeinsam die Entwicklung beeinflussen. In den Folgegenerationen läßt die Heterosiswirkung nach, da die Gene durch Aufspaltung wieder voneinander getrennt werden. Heterosissaatgut beispielsweise muß daher jährlich durch Kreuzung geeigneter Partner neu gewonnen werden.

Auch die landwirtschaftliche und industrielle Mikrobiologie fußt auf genetischen Erkenntnissen. Durch Mutationsauslösung und anschließende Auslese leistungsfähiger Stämme besonders von Bakterien und Pilzen konnten die Herstellungskosten der aus diesen Organismen gewonnenen Antibiotika (Penizillin) bedeutend gesenkt werden. Bestimmte Hefen spielen in unserer Wirtschaft eine große Rolle durch die Produktion von Vitaminen, Aminosäuren und Eiweißen.

■ 500 kg Hefe erzeugen in ihrer Biomasse in nur 24 Stunden etwa 50 Tonnen Eiweiß, ein Rind dagegen produziert in der gleichen Zeit nur etwa 0,5 kg. Für die Verfütterung des Eiweißes aus Hefezellen oder gar den Verzehr durch den Menschen ist allerdings Voraus-

① Erläutern Sie die genannten Züchtungsmethoden! Benutzen Sie dazu auch Bio i Ü, Seite 251 ff.!

setzung, daß in ihm keine Stoffe enthalten sind, die den Geschmack beeinträchtigen. Solche Mutanten zu finden, die gleichzeitig industriemäßige Produktionsverfahren erlauben, ist Aufgabe der genetischen Forschung.

Die Genetik wird im Rahmen der jeweiligen Gesellschaftsordnung durch die Aufgabenstellung und Organisation der Forschung sowie durch den personellen, finanziellen und technischen Aufwand gesteuert. Über die weltanschaulichen Konsequenzen und philosophischen Probleme, die mit dem Erkenntnisfortschritt der Genetik verbunden sind, sowie die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten genetischer Erkenntnisse, an denen verschiedene gesellschaftliche Kräfte in unterschiedlicher Weise interessiert sind, ist die Genetik mit dem ideologischen und politischen Klassenkampf verbunden.

Unter sozialistischen Produktionsverhältnissen zum Wohle des Menschen angewendet, gibt das genetische Wissen eine wichtige Grundlage, die Bevölkerung zu ernähren, ihre Gesundheit zu schützen, den technischen Fortschritt zu fördern, die natürlichen Reichtümer der Biosphäre sinnvoll zu nutzen. Die Genetik nimmt an der Entwicklung der Naturwissenschaft zur unmittelbaren Produktivkraft teil. Sie schafft wissenschaftliche Voraussetzungen, um die Lebensprozesse zu beherrschen und die Biosphäre bewußt und planmäßig zu gestalten.

Ob genetische Kenntnisse für oder gegen den Menschen eingesetzt werden, entscheiden die jeweils herrschenden sozialökonomischen und geistigen Bedingungen der Gesellschaft. Es liegt in der Natur der herrschenden Klassen von Ausbeutergesellschaften, daß sie die Wissenschaft, auch die Genetik, vorrangig entwickeln, um den eigenen Profit zu steigern, ihre Macht zu festigen, Ausbeutung und Unterdrückung des eigenen Volkes und fremder Völker zu verstärken und die Menschen ideologisch zu verwirren, damit sie in eingebildeter Freiwilligkeit Ausbeuterinteressen dienen. Der imperialistische Mißbrauch biologischer Erkenntnisse reicht von ihrer profitgetriebenen Anwendung in der Natur bis zur Nutzung für die Vernichtung menschlichen Lebens. Er bedroht mit weiterem Erkenntniszuwachs zunehmend die Existenz und die Natur des Menschen. Nur die gegenüber dem Imperialismus wachsende politische, ökonomische und militärische Stärke der sozialistischen Staatengemeinschaft sowie der internationale antiimperialistische Kampf können die imperialistischen Mächte zwingen, ihre diesbezüglichen Ziele aufzugeben.

▶ Der zunehmende Erkenntnisgewinn über genetische Vorgänge wird wesentlich durch die enge Verflechtung mit anderen Wissenschaftsdisziplinen bestimmt.

Die Ergebnisse genetischer Forschung lassen immer mehr Möglichkeiten erkennen, in die Vererbungsabläufe steuernd einzugreifen (■ Isolation, Synthese und Austausch von Genen, Neukombination von Allelen, induzierte Mutation).

Diese Möglichkeiten haben große wirtschaftliche Bedeutung bei der Züchtung leistungsstarker Kulturpflanzen und Nutztiere sowie bei der Züchtung geeigneter Mikroorganismen für die Produktion von Antibiotika, Vitaminen, Aminosäuren, Eiweißen. Ihre medizinische Bedeutung liegt in erster Linie auf dem Gebiet der Prophylaxe und Therapie von Erbkrankheiten.

Die Anwendung genetischer Erkenntnisse unterliegt im Kapitalismus immanent der Gefahr des Mißbrauchs zu antihumanen Zwecken; sie setzt ein hohes Verantwortungsbewußtsein der Wissenschaftler voraus.

Register

* Abbildungshinweis

A

Adenin 144*f., 147*f
ADP 38, 40, 114
Aktionspotential 102ff.*, 106f., 111, 118
Aktivierungsenergie 29f.*, 34
Allel 157f., 175
Allelenpaare 160f.
-verteilung 159*
Alternsphase 124, 133
Aminosäurefolge 172*
-sequenz 148, 157, 162, 165, 168ff.*
Aneuploidie 180
Artmerkmale 136
Assimilate 35, 45f., 64, 68
—, Transport 26
Assimilation 34f., 57f., 65f., 68, 85, 89
Assimilatspeicherung 45ff.
Atemgase 66f.
Atmung 24, 65f., 68, 72ff.*, 84f.
—, äußere 66
—, äußere Faktoren 75ff.
—, innere 66, 68ff., 77
—, Teilschritte 68f.*, 73*
Atmungsaktivität 75ff.
-intensität 78
-kette 70f., 84
-substrate 68, 86
ATP 38ff., 42f., 45, 68f., 71f., 80, 84, 86ff., 114
Auslese 140
autotroph 34f., 57, 60
Auxin 116, 118

B

Basen, komplementäre 147
-austausch 178*
-folge 145, 148, 185
-paare 145, 178
-paarung 146*, 149, 166, 168
-sequenz 145, 148, 163, 169
-triplett 163, 164, 168
Befruchtung 121, 127*
Begattung 125
Beratungsstellen, humangenetische 186
Bewegungsphysiologie 93
Biokatalysatoren 7, 29ff., 33
biologische Oxydation 7, 68
Biomembranen 8, 10*ff., 25*, 31
—, Bau 8, 10*
—, Eigenschaften 8, 10f.
—, Funktion 8, 11
Biosynthesen 47, 86ff.
Blastomer 121f., 126
Blastozyste 127*f.
Blastula 122, 127
Boten- RNS 12
Bruttophotosynthese 52

C

Chemosynthese 35
Chlorophyll 12, 35f.*, 37, 48f., 119
Chloroplasten 12ff.*, 42, 48
Chromatin 7, 9*, 12, 141, 152
-gerüst 152
Chromatiden 143, 152, 155
Chromonema 143*
Chromoplasten 12, 14
Chromosomen 12, 141, 143*, 147, 152, 155
—, homologe 157
-anzahl 142, 180
-formwandel 140*
-mutationen 179f.*
-paare 155
-satz 142*, 156, 180, 182
-untersuchung 184

D

Dauerreiz 97
Defektgene 186
Deletionen 180
Deplasmolyse 23
Depolarisation 103ff.
Diffusion 20*ff., 24, 61
Dissimilation 65f., 79, 84, 86, 88
DNS 12, 143f., 147f., 151, 162*f., 165f., 171, 184
-Bestandteile 144*
-Doppelstrang 145f.*, 149ff.*
-Einzelstrang 145f., 149ff.*
-Funktionsstörungen 152
-Replikation 149ff.*, 155
Doppelhelix, DNS 145f.*
Dunkelreaktion 42f.

E

Eiweiße 7, 15, 65
-abbau 90
—, Bedeutung 171
-synthese 7, 12, 86ff., 90, 141, 170
—, Speicherstoff 18, 46
Eizelle 121f.
Ektoderm 122f., 128*
endoplasmatisches Retikulum 7, 8*, 11*, 15
Endoxydation 68, 71, 79
Energie 19, 25, 28f., 55f., 65, 68, 72, 80, 84, 94, 96, 100, 102, 105, 108, 113f.
-bedarf 34, 105
-bindung 28, 35f., 38f., 42, 45, 54, 60, 84, 86ff., 103, 114
-freisetzung 19, 25, 28f., 36, 38, 40, 55, 65, 68, 71ff., 78, 80, 84, 86, 114
-speicherung 68, 114

Entoderm 122f., 128*
Entwicklung,
—, direkte 123*
—, indirekte 123*
—, ontogenetische 123
Entwicklungsphasen 132
Enzymaktivität 32*
Enzyme 7, 18, 27, 29ff., 34, 38, 40, 48, 61f., 64, 68
—, Benennung 31
—, industrielle Nutzung 33
—,wasserstoffübertragende 40*
Enzymeiweiße 171
Enzym-Substrat-Komplex 29f.*
Enzymwirkung 32
Embryo 129
Embryoblast 127*f.
Embryonalentwicklung 120f., 123, 125f., 130
Erbanlagen 135ff., 141, 171
Erbinformation 12, 144, 173
—, Realisierung 171
Erkrankungen, genetisch bedingt 183
Ernährung 46, 90f.
Erregbarkeit 101
Erregung 100, 104ff., 108, 111ff., 118
Erregungsbildung 107
-leitung 104ff., 118
-übertragung 106ff., 111
-vorgang 101, 104
Essigsäurebakterien 83

F

Ferntransport 19, 24
Fette, Abbau 86, 90
— ,Speicherstoffe 18, 46
—, Synthese 86, 90
Flimmerbewegung 110, 111
Follikel 125
Furchungsstadien 121*
-teilungen 121f., 127*
-zellen 122

G

Gärung 65, 79
—, alkoholische 80
—, Essigsäure- 83
—, Milchsäure- 82f.
Gärungsprodukt 79
-substrat 79f.
Gasaustausch 66, 77
Gastrula 123
Gastrulation 122*
Gen 157, 161, 164, 167, 169, 172, 175, 185
Generatorpotential 111
Genetik 135
genetische Forschung 185ff.
-Information 15, 88, 135, 139, 141, 145, 147f., 161ff., 167f., 172, 174, 185
Genetischer Kode 163f., 172
Genmutationen 178*
Genommutationen 180, 182
Genotyp 139, 159ff.
Geotropismus 115
Geschlechtsreife 120, 123
—, Phase der 124
Glykolyse 68, 72, 79f., 86
Grana 12f.*
Grundplasma 6ff., 12
Guanin 147*

H

halbdurchlässige Membran 20ff.*
Häm 36*
Heterosiseffekt 187
heterotroph 34, 57f., 60
heterozygot 175
homozygot 175
Humangenetik 183

I

Identische Replikation, DNS 145, 149, 151, 154, 173
impermeabel 25
Individualentwicklung 28, 119
Individuum 120, 121
Informationsübertragung 15
Ionenpumpen 103
Ionenverteilung 102, 103

J

Jugendentwicklung 120, 123, 124

K

Karyogramm 142*f., 181*
Kerngrundplasma 7, 12
Kernteilung 141, 143, 153*
Kernkörperchen 7, 12, 15
Keimblätter 122f., 128
—, Bildung 125*
—, Differenzierung 125*
Keimlinge, menschliche 125*, 129*
—, Schädigungen 136
Kode 165
Kodon 164, 168
Koenzym 29ff.*, 38, 40, 42, 69ff., 84, 87
Kohlendioxidreduktion 35, 37ff., 43, 52, 54
Kohlenstoffassimilation 34f.
—, Stoffgewinn 43
Kolloide 8
komplementäre Basenpaarung 146*
Krümmungsbewegung 115, 116

L

Lärmbekämpfung 99
-belastung 98
-pegel 99
-schutz 99
Latenzzeit 112
Leitbündel 24ff.
Leukoplasten 12, 14
Lichtenergie 35f.
Licht-Photosynthesekurve 51*, 52*,
Lichtreaktionen 13, 26f., 49, 68, 84
Lichtspektrum 48*
Lignin 16f.

M

Meiose 156
—, Verlauf 154*ff.
-störungen 182
Membransysteme 7f., 11ff., 19
-potential 102ff., 107
Mendelsche Gesetze 159ff.
Menstruationszyklus 125
Merkmalsausbildung 137, 139, 157f.*
-ausprägung 137
Mesoderm 122f., 128*f.
Metamorphose 123
Milchsäure 65, 79, 82, 114
-bakterien 82

-gärung 82
Mischerbigkeit 158
Mitochondrien 7, 9*, 14*f, 68, 71
Mitose 149, 154
—, Verlauf 152 f.*
-störungen 182
mitotische Teilung 121
Modifikation 137ff., 173
Morula 122, 127
mRNS 148, 164
-Kode 163
Muskel 111, 113f.,
—, Aufbau 113*
-bewegung 111
-kontraktion 112f.*
-zelle 108, 111
Mutagene 173, 176f.
Mutation 137, 139f., 157, 173*f., 176
Mutationszüchtung 174
Myelinscheide 105

N

Nachgeburtliche Entwicklung 130
NAD 69f.
NADP 40, 84
$NADPH_2$ 40, 42, 69, 80, 86f.
Nährsalz-Ionen 25*f.
Nahrungsspezialisten 57ff.*
Nahrungsvakuolen 18
Nerv 113
Nervenfaser 100f*, 103ff., 111
-system 100, 103, 113, 128
-zelle 101f., 104*, 106, 108, 111, 118
Nettophotosynthese 52
Neuralplatte 128
Neuralrohr 128
Nukleinsäuren 12
-moleküle 141
Nukleotide 144f., 151, 157, 163

O

Ontogenese 119, 120, 125
Organausbildung 128f.
Organdifferenzierung 123
Osmometer 21
Osmose 20f., 23f., 64
osmotische Barriere 19
osmotischer Druck 21ff.*
osmotische Verhältnisse 7
Ovulation 125ff.*
Oxydation des Wasserstoffs 68, 70ff., 86
Oxydoreduktasen 31, 40, 42, 71

P

Parasiten 64
Peptidbindung 88
permeabel 20, 22
pflanzliche Rohstoffe 17*f.
Phänotyp 139, 159ff., 171, 173
Phenylketonurie 179
Phosphortransferasen 85
Phosphorylierung 42, 45, 85
Photolyse des Wassers 36*f., 39f., 42
Photosynthese 7, 12ff., 24, 35ff., 68, 70, 84, 88
—, Bedeutung 54f.
—, Faktoren 48ff.
—, Kompensationspunkt 49 f.
—, Stoffgewinn 52f., 55
Phototropismus 115, 116
pH-Wert 7, 32, 61
Pigment-Eiweiß-Komplex 12, 14
Plasmabewegung 109*
Plasmalemma 7, 11, 20
Plasmaströmung 7f., 109*
Plasmolyse 22*f.
Plastiden 7, 9*, 12, 15
Plazenta 130
Polyploidie 180ff.
-stufen 182*
Potentialmessung 100*, 102*
Progesteron 126
Proplastiden 9*, 12
Protoplasma 5ff., 10f., 16, 24, 117
Pubertät 125

R

Ranvierscher Schnürring 105*f.
Rauschgift 107
Reaktion 98, 108
Reaktionsgeschwindigkeit 32, 34
Redoxreaktionen 36ff., 68, 70f.
—, elektronenübertragende 39
—, wasserstoffübertragende 40
Redoxkette 39f., 42
Redoxpotential 39
Reduktionsteilung 154*., 156
Regulation, Zellfunktionen 7
Reinerbigkeit 158
Reiz 94, 96ff., 103f., 106, 108, 112, 115f., 118
—, adäquat 118
-aufnahme 95, 100, 108, 118
-barkeit 93, 94, 117
-einwirkung 97f.
-energie 100, 108
-intensität 104
-physiologie 93ff.
-reaktion 100, 108
-summation 97
-überschwellig 97ff., 104
-unterschwellig 97, 103
Rekombination 157, 160*f.
Relative Konstanz 136
Replikation, identische 145, 149, 151, 154, 173
Repolarisation 104
Resorption 60f.
Ribonukleinsäuren s. RNS
Ribosomen 7, 9*, 11*f., 168
RNS 12, 15, 143, 147f., 151, 166ff., 171
RNS, Bestandteile 147*
Ruhepotential 102ff.,* 107

S

Saprophyten 64
Sauerstoffnachweis 37*
Saugkraft 21
Saugspannung 22f.*, 24
Säurekreislauf 68f., 71f., 86, 89
Säurezyklus 86
Schwellenpotential 102ff., 107, 111
Schwellenwert 96f.
semipermeabel 20, 22f.
Sichelzellanämie 176
Sinneszellen 95ff.*, 106, 118
—, Schädigungen 98*
Skelettmuskulatur 129
Speicherorgane 45ff.
Speicherstoffe 14, 18, 46f.*
Spindelapparat 152, 155
Spermien 125, 126
Stärkespeicherung 7
Startkodon 168
Stoffausscheidung 7

Stoffaustausch 19ff., 24
Stoffspeicherung 7, 18
Stofftransport 20, 24ff., 67, 85, 110
Stoffwechsel 27ff., 112, 124
-aktivität, 8, 76
-zusammenhänge 84ff.
Stoppkodon 168
Streß 98
Struktureiweiße 171, 172
Strukturgene 170
Stützfunktion 7
Substratabbau 72, 79
Substratoxydation 69, 72*, 86
Synapse 106.,* 111*

T

Tetanus 112, 113
Thymin 144*
Tonoplast, 7, 11, 20
Tonus 113
Transferasen 31
Transkription 166*f., 170
Translation 168f.*, 170
Transpiration 24
Transpirationssog 24
Trisomie 21, 181*f., 184
tRNS 148
Trophoblast 127*
Tropismen 115
Tüpfel 16, 19*
Turgordruck 18

U

Umwelt, Beeinflussung, Merkmalsausbildung 138, 157, 171, 174ff.
—, Beeinflussung, Stoffwechsel 19, 24, 48ff., 66ff., 75ff.
—, und Reizbarkeit 93, 99, 100; 115, 118
Urazil 147*

V

Vakuolen 7, 9*, 18, 22f.
Variabilität 136, 137, 140
Verdauung 7, 58, 60f.
Verdauungswege, Mensch 62*
Vererbung 7, 135, 185
Vitamin 31*, 91

W

Wachstumsbewegung 115
Wachstumshormon 106, 116
Wanddruck 22
Wasser, Aufnahme und Transport 24f.
Wasserstoffbrückenbindung 146*

Z

Zellbestandteile 6f.
Zelle 5*, 6*, 9*
Zellenlehre 5
Zellkern 7, 9*, 12, 15, 141
Zellorganellen 6f., 153
Zellplasma 20
Zellsaft 18, 22f.*
Zellteilung 12, 121, 153
Zellulose 15*ff.
Zellwand 7, 15*f., 18, 24
Zentralnervensystem 106, 118
Zentromer 143, 152
Zottenhaut 130
Züchtung 187
Zwillinge, dizygotische 139
—, monozygotische 136, 139
Zygote 121, 126
Zygotenkern 126
Zytoplasma 7, 12, 15, 19
Zytosin 147*

normale Teilungen

mitotische Fehlverteilungen

1. meiotische Teilung

2. meiotische Teilung

Befruchtung

Eizelle

Samenzelle

Zygote

Zygotenteilung

2. Teilung

normal

Verteilungs fehler

Verteilungs fehler

Mosaik

Mosaik

meiotische Fehlverteilungen

1. meiotische Teilung

Verteilungs fehler

2. meiotische Teilung

Verteilungs fehler

Befruchtung

Zygotenteilung

Trisomie

Monosomie

Trisomie

Monosomie

Kurzwort: 01 12 55 Lehrb. Biolog. Kl 12
Schulpreis DDR: 3,20