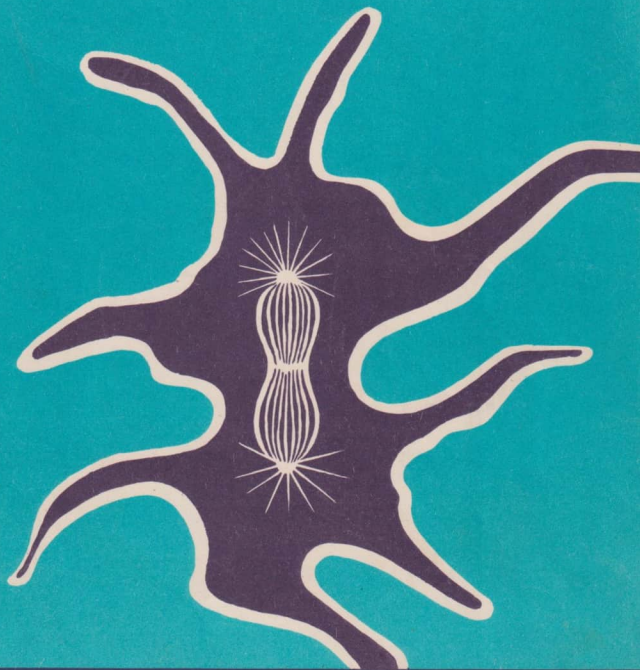


Willi-Farger-Oberschule
Pasewalk

PHYSIOLOGIE



BIOLOGIE

EIN LEHRHEFT FÜR DIE ERWEITERTE OBERSCHULE
II. KLASSE

ZUR PHYSIOLOGIE
DER PFLANZEN UND TIERE



VOLK UND WISSEN
VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1962

Dieses Lehrheft wurde verfaßt
von Dr. Herwart Ambrosius, Dipl. Biol. Armin Ermisch, Dr. Gerhard Lerch
und Dipl. Biol. Horst Schöffner
An der Entwicklung des Lehrheftes wirkten viele Lehrer und Wissenschaftler mit.
Redaktionelle Bearbeitung: Gertrud Kummer

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik
als Lehrbuch für die zwölfklassige polytechnische Oberschule (erweiterte Oberschule)
bestätigt

Mit 52 Abbildungen im Text
Redaktionsschluß: 21. Mai 1962

Einband: Günther Klaus

Ausstattung: Atelier Volk und Wissen Berlin

ES 11 H · Bestell-Nr. 01 932-1 · 1,90 DM · Lizenz Nr. 203 · 1 000/62 (E)

Satz und Druck: (III/9/1) Sächsische Zeitung, Dresden

Inhaltsverzeichnis

Bau und Funktion der Zelle	5	Gärung	53
Die Zelle als Grundeinheit der Lebewesen	5	Zusammenwirken der Stoffwechsel-	
Bestandteile der Zelle	5	vorgänge im Organismus	55
Das Protoplasma	5	Grund- und Nebenstoffwechsel	
Bau und Eigenschaften des Protoplasmas	11	der Pflanzen	59
Die Zelle als osmotisches System	13	Kreislauf der Stoffe in der Natur	61
Differenzierung innerhalb der Zelle	15	Fortpflanzung und Entwicklung	62
Zellbestandteile	16	Wesen und Form der Fortpflanzung	62
Zellvermehrung	19	Geschlechtliche und ungeschlechtliche	
Differenzierung zwischen den Zellen —		Fortpflanzung	63
Gewebe	20	Die Befruchtung bei Landorganismen ..	66
Einzeller und Vielzeller	20	Generationswechsel	68
Stoffwechsel	23	Entwicklung der befruchteten Eizelle ..	71
Die Bedeutung des Wassers für das Leben	24	Direkte und indirekte Entwicklung	78
Baustoffwechsel	27	Reizphysiologie der Pflanzen und Tiere	81
Autotrophe Ernährungsweise	28	Reizbarkeit als Grundeigenschaft der leben-	
Heterotrophe Ernährungsweise	38	den Materie	81
Heterotrophe Ernährungsformen bei		Der Reiz	81
Pflanzen	47	Die Erregung	83
Betriebsstoffwechsel	48	Die Reaktion	86
Atmung	49	Vergleichende Betrachtung der Reizvor-	
		gänge bei Pflanzen und Tieren	97

Einleitung

Wie auf allen Gebieten der Wissenschaft, so haben sich auch im Bereich der Biologie zahlreiche Fachgebiete herausgebildet. Sie untersuchen jeweils andere Erscheinungen der lebenden Materie und sind oft auch durch spezielle Arbeitsmethoden gekennzeichnet. Neben den Unterschieden haben die verschiedenen Arbeitsgebiete selbstverständlich vieles gemeinsam; sie sind alle mehr oder weniger eng miteinander verbunden.

Für unsere Überlegungen sind zwei Ordnungsprinzipien umfassender Art von Interesse.

Einmal unterscheiden wir zwischen allgemeinen und speziellen Richtungen. So kennen wir zum Beispiel eine allgemeine Zoologie. Sie erforscht die für alle Tiere zutreffenden Erscheinungen. Die spezielle Zoologie dagegen beschäftigt sich überwiegend mit der Beschreibung der einzelnen Tiersippen, der Erforschung ihrer Stammesgeschichte und ihrer Beziehung zueinander sowie ihrer Verbreitung auf der Erde.

Zum anderen unterscheiden wir zwischen Morphologie einerseits und Physiologie andererseits. Die Morphologie untersucht die äußere Gestalt und den inneren Bau der Lebewesen; sie arbeitet vorwiegend beschreibend. Die Physiologie erforscht die Lebensvorgänge der Organismen; sie arbeitet vor allem experimentell.

Wir beschäftigen uns im folgenden mit ausgewählten Problemen der allgemeinen Physiologie, also mit grundlegenden Lebenserscheinungen, die bei allen Organismen mehr oder weniger ähnlich auftreten. Als Beispiele verwenden wir in erster Linie Pflanzen und Tiere.

Bau und Funktion der Zelle



Mathias Jakob Schleiden (1804 bis 1881; links), deutscher Botaniker. Schleiden erkannte 1838, daß alle Pflanzen aus Zellen aufgebaut sind.
Theodor Schwann (1810 bis 1882; rechts), deutscher Anatom. Schwann erbrachte 1839 den Nachweis, daß alle Tiere aus Zellen aufgebaut sind. Schwann und Schleiden gelten als Begründer der Zellenlehre.

Die Zelle als Grundeinheit der Lebewesen

Mit der ständigen Verbesserung der Forschungsinstrumente konnten Bau und Lebensweise der tierischen und pflanzlichen Zellen immer genauer untersucht werden. Die Zellforschung erhielt neue Impulse durch die Entdeckung, daß es zahlreiche Organismen gibt, die nur aus einer einzigen Zelle bestehen. Diese Zelle übt sämtliche Lebensfunktionen aus. Man konnte viele komplizierte Lebensäußerungen an einzelnen Zellen studieren, die weitaus besser zu übersehen sind als die vielzelligen Organismen.

Bestandteile der Zelle

Das Protoplasma

Hauptbestandteil jeder lebenden Zelle ist das Protoplasma. Untersucht man Protoplasma unter dem Mikroskop, so sieht man in seiner Hauptmasse, dem Zellplasma, gewöhnlich auch bei stärkster Vergrößerung überraschend wenig: Es erscheint als farblose, etwas trübe, wäßrige Flüssigkeit, die mehr oder weniger zäh ist.

Im Zellplasma liegen die übrigen — meist kugel-, körnchen- oder stäbchenförmigen — Bestandteile des Protoplasmas eingebettet.

Das Protoplasma bildet den gesamten lebenden Inhalt der Zelle.

Chemische Zusammensetzung des Protoplasmas. Einfach und genau läßt sich bestimmen, aus welchen Elementen die lebende Materie besteht. In erster Linie sind es: Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), dann folgen Phosphor (P), Schwefel (S), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Eisen (Fe) und Chlor (Cl).

In sehr geringen Mengen findet man noch Mangan (Mn), Kupfer (Cu), Bor (B), Jod (J), Zink (Zn) u. a., die auch als Spurenelemente bezeichnet werden. Etwa 35 chemische Elemente werden regelmäßig in der lebenden Substanz gefunden, wobei die ersten zehn der obengenannten Stoffe bei weitem überwiegen (Abb. 1).

	O	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	O
					H					He
He	Li	Be	B	C	N	O	F			Ne
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl			Ar
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
		Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd
		Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J		Xe
Xe	Cs	Ba	La	Ce	Ta	W		Os	Ir	Pt
		Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po			Em
Em		Ra	Ac	Th	Pa	U				

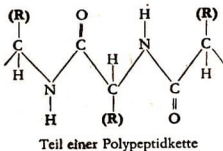
Abb. 1 Pflanzennährstoffe im Periodensystem (schwarze Felder: Grundnährstoffe, umrandete Felder: Spurenelemente)

Chemische Verbindungen im Protoplasma. Eine Analyse der chemischen Verbindungen im Protoplasma ergibt zunächst einen hohen Anteil an Wasser (meist mehr als 70%). Eiweiße, Fette und fettähnliche Substanzen (Lipoide) sowie Kohlenhydrate bilden die Hauptmasse der festen Bestandteile. Ein kleiner Rest anorganischer Salze bleibt bei der Verbrennung als Asche zurück.

Das Protoplasma eines Seeigel-Eies enthält:	Wasser	78,3%
	Eiweiße	15,2%
	Fette und Lipoide	4,8%
	Kohlenhydrate	1,4%
	Asche	0,3%
		<u>100,0%</u>

Zum Verständnis der Lebensprozesse ist es notwendig, die Zusammensetzung und die wichtigsten Eigenschaften dieser Stoffgruppen zu kennen.

Eiweiße, Kohlenhydrate und Fette sind meist hochmolekulare Stoffe — die Molekulargewichte erreichen bei den Eiweißen nicht selten mehrere Millionen —, aber diese riesigen Moleküle sind aus einer geringen Anzahl organischer Grundbausteine zusammengesetzt, die für den gesamten Bereich des Lebens einheitlich sind.



Zwei Aminosäuren ergeben Dipeptide, drei Aminosäuren Tripeptide, zahlreiche Aminosäuren Polypeptide; mehrere Polypeptide verbinden sich zu den Proteinen, den einfachen Eiweißen.

Bei den Proteinen liegen meist zahlreiche Peptidketten nebeneinander, so daß auch deren Seitenketten miteinander in Verbindung treten können.

Die Zahl der Aminosäuren in einem Proteinmolekül ist sehr unterschiedlich, sie kann mehrere Hunderttausend betragen; dann steigen die Molekulargewichte bis über 10 Millionen an. Selbst die größten Eiweißmoleküle sind noch nicht mit dem Lichtmikroskop zu erkennen; sie lassen sich jedoch mit dem Elektronenmikroskop sichtbar machen.

Die Moleküle des roten Blutfarbstoffes Hämoglobin beispielsweise sind etwa $0,000\ 003\ \text{mm} = 3\ \text{nm}$ lang, die des blauen Blutfarbstoffes mancher Weichtiere (Hämocyanin) etwa $0,000\ 060\ \text{mm} = 60\ \text{nm}$. Zum Vergleich: Die winzigen roten Blutkörperchen haben einen Durchmesser von $7\ 500\ \text{nm}$, die kleinsten Bakterien sind etwa $750\ \text{nm}$ lang.

Die Vielfalt der Eiweiße ergibt sich daraus, daß sich die einzelnen Aminosäuren in wechselnder Anzahl und Anordnung miteinander verbinden können, wobei je nach Anzahl, Typ und Anordnung dieser Grundbausteine ganz unterschiedliche Eigenschaften der Eiweißkörper entstehen.

Nehmen wir an, es gäbe 10 verschiedene Aminosäuren und daraus sollten Proteine aus je 5 dieser Bausteine zusammengesetzt werden. Das ergibt $10^5 = 100\ 000$ verschiedene Kombinationsmöglichkeiten; bei Proteinen mit nur 20 Aminosäurebausteinen wären es schon $10^{20} = 100$ Trillionen. Die natürlichen Eiweiße bestehen aber in der Regel aus mehreren hundert bis tausend Aminosäuremolekülen. Unter diesen Umständen ist die Zahl der möglichen Kombinationen der 20 häufigsten 2-Aminosäuren allein vielmillionenfach größer als die Gesamtheit aller Arten von Lebewesen überhaupt.

Auf diese Weise ist es möglich, daß nicht nur die einzelnen Arten von Organismen, sondern auch die einzelnen Lebewesen einer Art und die Zelltypen in den verschiedenen Geweben eines Lebewesens sich voneinander in der Zusammensetzung ihrer Eiweiße unterscheiden. Das Eiweiß der Muskeln ist beispielsweise verschieden von dem der Haut, der Nervenzellen, der Drüsen u. a.

Die reinen Proteine können sich mit anderen organischen Stoffen verbinden, die meist ähnlich verwickelt gebaut sind. Damit entstehen zwei Gruppen von Eiweißen:

Proteine —	einfache Eiweiße, bestehen nur aus Aminosäuren,
Proteide —	zusammengesetzte Eiweiße, bestehen aus Proteinen und anderen organischen Verbindungen.

Wichtige Gruppen von Proteiden sind zum Beispiel:

Lipoproteide —	Proteine in Verbindung mit Lipoiden,
Chromoproteide —	Proteine in Verbindung mit biochemisch wirksamen Farbstoffen (z. B. Chlorophyll),
Nukleoproteide —	Proteine in Verbindung mit Nukleinsäuren. Sie sind vor allem für die Vermehrung der Zellsubstanz von entscheidender Bedeutung,

Glykoproteide — Proteine in Verbindung mit einem Kohlenhydrat,
 Phosphoproteide — Proteine in Verbindung mit einem Phosphorsäurerest.

Der außerordentlich komplizierte Bau der Eiweißkörper bedingt, daß trotz modernster chemischer Methoden bisher nur einfachste Proteine synthetisch hergestellt werden konnten. Bei den Proteiden steht die Wissenschaft immer noch am Anfang ihrer Forschung. Dennoch konnte die Zusammensetzung verschiedener Eiweiße aus ihren Aminosäurebausteinen und deren Reihenfolge im Eiweißmolekül erforscht werden. Gut bekannt ist der Bau des Insulins.

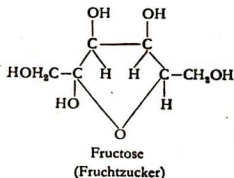
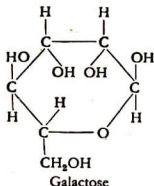
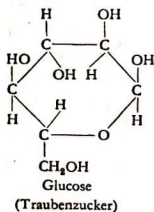
Besondere Verdienste um die Erforschung des Aufbaus der Eiweiße hat sich Nobelpreisträger LINUS PAULING (USA) erworben. Dieser hervorragende Forscher steht heute an der Spitze der amerikanischen Wissenschaftler, die für das Verbot der Atomwaffen kämpfen.

Kohlenhydrate

Kohlenhydrate bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, wobei — wie im Wassermolekül — meist doppelt so viele Wasserstoffatome wie Sauerstoffatome auftreten.

Grundbausteine der Kohlenhydrate sind die Monosaccharide (z. B. Traubenzucker):

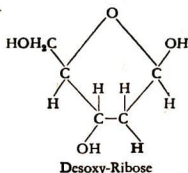
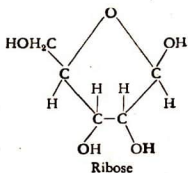
Hexosen — $C_6H_{12}O_6$ — enthalten 6 C-Atome.



Andere niedermolekulare Kohlenhydrate:

Pentosen — $C_5H_{10}O_5$ — enthalten 5 C-Atome.

Beispiele:



Triosen — $C_3H_5O_3$ — enthalten 3 C-Atome.

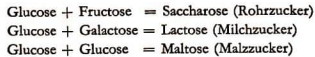


Triosen entstehen beim Auf- und Abbau von Kohlenhydraten.

Höhermolekulare Kohlenhydrate:

Disaccharide — $C_{12}H_{22}O_{11}$ — enthalten 12 C-Atome.

Sie entstehen durch Kondensation von 2 Hexosemolekülen unter Abspaltung von Wasser.



Polysaccharide — $(C_6H_{10}O_5)_n$ (n = oft mehrere hundert).

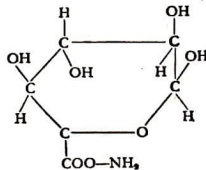
Polysaccharide entstehen hauptsächlich durch Verbindung von Hexosen unter Abspaltung von Wassermolekülen.

Stärke — mehrere hundert Glucosemoleküle; Stärkemolekül verzweigt oder unverzweigt; spiralgewunden.

Zellulose — bis 2 000 Glucosemoleküle, Zellulosemolekül kettenförmig, langgestreckt.

Glykogen — mehrere hundert Glukosemoleküle, ähnlich wie Stärke gebaut.

Chitin — der Baustoff der Pilzzellwände und des Insektenaußenskeletts — ist ein stickstoffhaltiges Polysaccharid, bei dem an jeden Glucoserest eine Aminogruppe ($-\text{NH}_2$) angelagert ist:



Monosaccharide (Triosen, Pentosen, Hexosen) und Disaccharide sind leicht wasserlöslich, die Polysaccharide dagegen sind praktisch unlöslich in Wasser.

Fette und Lipoid

Fette entstehen durch Veresterung aller drei OH-Gruppen des Propantriols mit gleichen oder verschiedenen Fettsäuren.

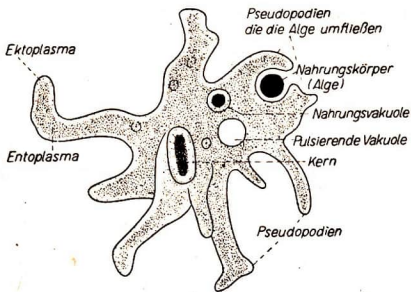


Abb. 2 Bau der Tierzelle

sind nicht starr und unveränderlich. Ihre Zusammensetzung und Festigkeit kann wechseln, ihre Bestandteile werden ständig mit Stoffen des dünnflüssigen Innenplasmas ausgetauscht.

Dieser Vorgang läßt sich besonders gut bei der Bewegung der Wechseltierchen (Amöben) verfolgen. Am Protoplasma erkennt man eine helle, durchsichtige, zähe Außenzone, das Außenplasma, das sich deutlich von dem dünnflüssigeren, körnigen Innenplasma unterscheidet. Wenn das Scheinfüßchen einer Amöbe wächst, wird Innenplasma durch Wasserabgabe in Außenplasma umgewandelt. Wird umgekehrt an einer anderen Stelle ein Scheinfüßchen eingezogen, so werden Teile des Außenplasmas durch Wasseraufnahme und Quellung in Innenplasma umgewandelt (Plasmabewegung, Abb. 2).

Vakuolen — Zellsaft

Mit Hilfe halbdurchlässiger Plasmagrenzschichten werden auch größere flüssigkeitsgefüllte Hohlräume, die Vakuolen, vom Protoplasma abgegrenzt.

Feinste wäßrige oder fetthaltige Tröpfchen, die von Lipoidschichten umschlossen werden, finden sich schon in jungen Zellen. Mit zunehmendem Alter und wachsender Größe der Zellen dehnen sich die mit wäßrigen Lösungen gefüllten Bläschen im Protoplasma zu umfangreichen Hohlräumen aus, die den Zellsaft enthalten. Zellsafträume sind vor allem bei Pflanzenzellen reichlich vorhanden und nehmen in ausgewachsenen, alten Zellen fast den gesamten Innenraum ein, das Protoplasma bleibt nur am Rande als dünner Wandbelag erhalten (Abb. 3). Im Zellsaft sind vor allem Säuren, Salze und Zucker gelöst, aber auch verschiedene andere Stoffe, beispielsweise Farbstoffe (Anthozyan), Gerbstoffe und Alkaloide. Die im Zellsaft enthaltenen Substanzen sind vielfach Abfallprodukte, die für das Protoplasma schädlich sind und von ihm abgesondert werden. Der Zellsaft enthält oft für das Protoplasma derselben Zelle äußerst giftige Substanzen. Deshalb sind die Grenzschichten zwischen Plasma und Vakuole besonders

dicht. Stoffe, die einmal in den Zellsaft abgetrennt wurden, können in der Regel nicht mehr in das Protoplasma zurückkehren.

Anders verhält es sich bei den Nahrungsvakuolen vieler Protozoen. Hier wird die aufgenommene Nahrung vom Protoplasma in einen bläschenförmigen Hohlraum eingeschlossen, in den Verdauungssäfte abgegeben werden. Die aufgelöste Nahrung wird dann durch die Plasmagrenzschichten der Vakuolenwandung in das Plasmainnere aufgenommen.

Die Zelle als osmotisches System

Da die Plasmagrenzschichten halbdurchlässig sind, verhindern sie einen freien, ungehemmten Stoffaustausch zwischen dem Protoplasma und seiner Umgebung. In der Regel diffundieren fast ausschließlich Wassermoleküle ungehindert durch die Grenzflächen des Protoplasmas nach beiden Seiten. Die Zelle wird durch die Eigenschaften der Plasmagrenzschichten zu einem osmotischen System. Daraus ergeben sich unter anderem folgende Erscheinungen.

Ständige Wasseraufnahme aus der Umgebung. Die Proteine des Protoplasmas haben die Eigenschaft, mit den meisten ihrer Seitenketten Wasser anzuziehen, sie umgeben sich mit einem Wassermantel; das ganze Plasmagerüst quillt dadurch auf. Die zahlreichen Salzionen können nicht ohne weiteres nach außen diffundieren, sie üben beständig eine osmotische Saugwirkung auf die Wassermoleküle aus, die sich außerhalb der Zelle befinden. Eine lebende Zelle nimmt ständig aus ihrer Umgebung Wasser auf.

Um Wasser aus der Umgebung aufzunehmen, bedarf es keiner besonderen Energieleistung durch das Protoplasma. Die Wasseraufnahme erfolgt vorwiegend passiv; Wasser strömt ständig von außen in die Zelle ein.

Osmoregulation. Durch eine ständige Wasseraufnahme vergrößert sich der Zellinhalt, die Plasmagrenzschichten werden gedehnt. Sie würden schließlich platzen, das Protoplasma würde zerfließen und seinen Zusammenhalt, also seine Lebensfähigkeit verlieren.

Das Verhalten roter Blutkörperchen in verschiedenen konzentrierten Lösungen zeigt folgender Versuch: Zwei Reagenzgläser werden mit je drei Tropfen Blut gefüllt. Einem Reagenzglas wird 10 ml 0,9%ige Kochsalzlösung zugesetzt (diese Lösung hat etwa die gleiche Konzentration wie die Blutflüssigkeit), dem anderen 10 ml destilliertes Wasser. Die Durchsichtigkeit der beiden gut durchmischten Flüssigkeiten wird geprüft, indem man Druckschrift hinter die Reagenzgläser hält. — Die

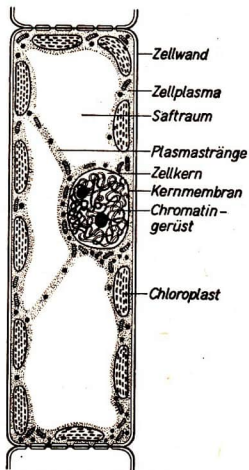


Abb. 3 Bau der Pflanzenzelle

Flüssigkeit im ersten Reagenzglas ist undurchsichtig (deckfarben). Im zweiten Reagenzglas ist die Lösung durchsichtig (ackfarben), man kann die Schriftprobe lesen. In diesem Glas zerplatzten die Blutzellen, ihre festen Bestandteile sanken nach unten, im Wasser befindet sich nur noch der rote Blutfarbstoff.

In den Blutgefäßen platzen die roten Blutkörperchen nicht, weil die sie umgebende Blutflüssigkeit eine Salzlösung darstellt, die das Wasser mit gleicher Saugkraft festhält, wie die roten Blutzellen es anziehen. Ähnlich verhält es sich mit der Körperflüssigkeit sämtlicher Tiere.

Die Zellflüssigkeit der Meeresorganismen weist ungefähr dieselbe Konzentration auf wie die Salzlösung, in der sie leben. — Im Süßwasser strömt in die Protozoen ständig Wasser ein. Unter dauerndem Aufwand an Energie wird das überschüssige Wasser wieder aus der Zelle hinausbefördert. Hierzu dienen die pulsierenden Bläschen (Vakuolen) mit dehnbaren Wänden aus besonders zusammengesetzten Plasmagrenzschichten. In diese Hohlräume wird das überschüssige Wasser vom Plasma abgeschieden. Von Zeit zu Zeit ziehen sich die Wände der Vakuolen zusammen und pressen das Wasser aus der Zelle hinaus. Der ständige Wasserzstrom wird reguliert, man spricht daher von Osmoregulation.

In dem ausgeschiedenen Wasser sind gelöste Abfallstoffe enthalten. Mit den Vakuolen, die einen lebensgefährlichen Wasserüberschuß aus den Zellen entfernen, entstanden die ersten Ausscheidungsorgane der Protozoen im Süßwasser.

Bei wasserlebenden Wirbeltieren, die das Wasser durch Kiemen (z. B. Fische) oder durch die Haut (z. B. Frösche) aufnehmen, wird es durch die Nieren wieder ausgeschieden. Pulsierende Bläschen bei Protozoen sind also Zellbestandteile mit Nierenfunktion.

Pflanzenzellen haben keine pulsierenden Vakuolen. Hier ist das Protoplasma in der von ihm selbst gebauten festen Zellwand eingeschlossen und kann sich nur so weit ausbreiten, wie die Zellwände sich zu dehnen vermögen. Sobald der Gegendruck der gedehnten Zellwände (Wanddruck) ebenso groß wird wie die Saugkraft des Protoplasmas, kann in die Zelle kein Wasser mehr eindringen.

Auswahlvermögen für Nährstoffe. Die Grenzschichten des Protoplasmas lassen nicht nur Wasser, sondern auch andere Verbindungen eindringen. Welche Atome oder Moleküle eindringen können, hängt von der Zusammensetzung, dem Aufbau und dem Zustand der jeweiligen Plasmagrenzschichten ab. Auf diese Weise werden nur bestimmte Substanzen aufgenommen.

Das Protoplasma der Zellen hat sich im Laufe von Jahrmilliarden unter bestimmten Außenbedingungen entwickelt und ist diesen Verhältnissen angepaßt; sein Auswahlvermögen beschränkt sich in der Regel auf die Stoffe, mit denen es unter den natürlichen, seit jeher gewohnten Bedingungen zusammentrifft. Durch die Poren in den Plasmagrenzschichten und deren Lipoidbezirke können aber auch andere Stoffe eindringen, sofern diese eine entsprechende Molekülgröße oder Fettlöslichkeit besitzen. Sie können erheblichen Schaden anrichten, teilweise die gesamte Organisation des Plasmas vernichten. Solche Substanzen nennt man allgemein Giftstoffe (Alkohol, Blausäure u. a.).

Gifte sind Stoffe, die durch die Plasmagrenzschichten in das Zellinnere eindringen können und dort das Protoplasma schädigen oder zerstören.

Bringt man eine Zelle in eine Salzlösung, deren Konzentration größer ist als die des Protoplasmas (einschließlich des Zellsaftes), so können zwar die Salze nicht in das Protoplasma eindringen, sie entziehen ihm aber Wasser; der Zellinhalt wird dadurch kleiner. Diese Erscheinung heißt Plasmolyse, sie kann durch nachfolgende Wasserzugabe wieder rückgängig gemacht werden.

Rote Blutkörperchen schrumpfen zusammen, wenn man sie in starke Salz- oder Zuckerlösungen bringt.

Bei Pflanzenzellen zieht sich unter dem Einfluß starker Salz- oder Zuckerlösungen das Protoplasma zusammen und löst sich von der Zellwand ab.

Will man Zellen in lebendem Zustand längere Zeit beobachten, so muß man sie in einer Umgebung halten, deren osmotische Verhältnisse annähernd ihren natürlichen Bedingungen entsprechen. Tierische Zellen und Gewebe werden daher meist in einer „physiologischen Kochsalzlösung“ untersucht (Lösungen von NaCl in Wasser, z. B. 0,9% für Säugerewebe, 0,65% für Amphibien).

Eine ähnliche Kochsalzlösung kann in Notfällen auch bei starkem Blutverlust vorübergehend in die Adern gebracht werden, sofern nicht die Möglichkeit einer Bluttransfusion besteht. Damit wird nicht das Blut ersetzt, sondern nur der Kreislauf aufgefüllt. Da Kochsalzlösung kein Eiweiß enthält, wird sie ziemlich schnell von den Geweben aufgesaugt. Man verwendet deshalb als Blutersatz meist besondere kolloidale Lösungen.

Leicht wasserlösliche Düngemittel (z. B. Kalisalze, Nitrate) dürfen nicht in beliebigen Mengen in den Acker eingebracht werden, da sonst die Bodenlösung zu hoch konzentriert wird und die Pflanzenwurzeln in ihrer Nährstoffaufnahme behindert oder gar Plasmolyse erzeugt.

Halbdurchlässige Plasmagrenzschichten (Abhängigkeit vom Stoffwechsel). Die Grenzschichten des Protoplasmas sind nur im lebenden Zustand halbdurchlässig. Das lebende Protoplasma bringt ständig eine große Menge Energie auf, um seine Grenzflächen in einem abgedichteten, halb durchlässigen Zustand zu erhalten. Sobald die Energieerzeugung durch die Atmung im Protoplasma aufhört, bricht das straffe Gerüst der Plasmagrenzschichten zusammen, die Grenzschichten werden vordurchlässig, und zwischen dem Protoplasma und seiner Umgebung sowie dem Zellsaft kann ein ungehinderter und unregelmäßiger Stoffaustausch eintreten. Damit aber werden der geordnete Ablauf der Lebensvorgänge und die Struktur des Protoplasmas vernichtet.

Tod zerstört die Halbdurchlässigkeit der Plasmagrenzschichten; umgekehrt führt der Verlust dieser Eigenschaft der Plasmagrenzflächen zum Zelltod. Die Halbdurchlässigkeit der Plasmagrenzschichten ist somit gleichzeitig Voraussetzung und Folgeerscheinung, ist Ursache und Auswirkung der Lebensvorgänge.

Differenzierung innerhalb der Zelle

Die einfachsten Lebewesen waren wahrscheinlich einfachste schleimige Protoplasma-klümpchen. Mit der Höherentwicklung des Lebens wurden auch die Lebensäußerungen des Protoplasmas vielseitiger. Aufnahme der Nahrung und ihre Verarbeitung, Stoffausscheidung, Reaktion auf Umweltreize, Bewegung und Vermehrung wurden nicht

von allen Bestandteilen des Protoplasmas gleichmäßig ausgeführt. Bereits innerhalb des Protoplasmas einer Zelle trat sehr früh eine Differenzierung ein, bestimmte Gruppen von Eiweißkörpern übernahmen bestimmte Funktionen.

Diese spezialisierten Eiweißkörper haben sich an besonderen Stellen innerhalb der Zelle konzentriert und bilden sogenannte Organellen, also Zellbestandteile mit bestimmten Lebensfunktionen.

Zellbestandteile

Zellkern. Im Zellkern haben sich vor allem Nukleoproteide und Nukleinsäuren konzentriert. Sie sind mit bestimmten Farbstoffen, besonders gut färbbar und heißen deshalb in ihrer Gesamtheit **Chromatin**.

Das Chromatin ist oft gerüstartig angeordnet, es kann aber auch in Form größerer Klumpen oder zahlreicher kleiner Körnchen auftreten. An dem Chromatingerüst sind neben den dicken, gut färbaren Chromatinteilen zahlreiche dünne, nicht oder nur schwach färbare Fäden erkennbar, das Achromatin. Das Ganze ist von Kernsaft umgeben. Der Zellkern wird durch eine feine plasmatische Grenzschicht, die Kernmembran, gegen das übrige Protoplasma abgegrenzt. Im Kernsaft liegen häufig ein bis mehrere Kernkörperchen (Nukleolen), kleine rundliche Gebilde, über deren Funktion noch nicht viel bekannt ist.

Unter besonderen Bedingungen, so bei der Zellteilung, bildet das Chromatin statt eines unregelmäßigen Netzwerkes fadenförmige Körper, die Chromosomen oder Kernschleifen.

Die **Chromosomen** (Kernschleifen) sind in ganz bestimmter Zahl und Form für jede Pflanzen- und Tierart charakteristisch. In der Regel gleichen jeweils zwei Chromosomen einander, sie treten also paarweise in den Zellen auf.

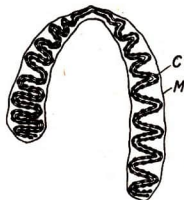


Abb. 4 Bau eines Chromosoms (Schema). M Hülle (Matrix), C Chromomere

Die Chromosomen bestehen aus mindestens vier nebeneinanderliegenden Eiweißfäden, auf denen, wie die Perlen einer Kette, die scheibchenförmigen Chromatinteilchen aufgereiht sind, die man auch Chromomere nennt. Die Chromomere auf einem Faden sind einander nicht gleich. Das ganze Fadenwerk ist in eine gallertartige Masse, die Matrix, eingebettet (Abb. 4).

Kernlose Zellen oder Zellteile können durchaus eine begrenzte Zeit leben und mitunter sehr wichtige Lebensfunktionen ausüben. Die zellkernlosen roten Blutkörperchen der Säugetiere und des Menschen zum Beispiel transportieren den Sauerstoff im Körper. Da der Zellkern aber die besonders für die Zellvermehrung wichtigen Nukleoproteide enthält, können sich Zellen ohne Kernsubstanz nicht mehr vermehren.

Der Zellkern hat für die Vererbungsvorgänge große Bedeutung.

Plastiden. Plastiden kommen nur in Pflanzenzellen vor. Es sind lebende Eiweißkörper. Wir unterscheiden im wesentlichen drei Gruppen: Chloroplasten, Leukoplasten und Chromoplasten.

Bei der Entwicklung einer Pflanze aus dem Samen entstehen alle Plastiden aus sehr kleinen, schon im Samen vorhandenen Vorstufen, den Proplastiden.

Chloroplasten. Chloroplasten können sehr verschiedenartig gestaltet sein (bei Zieralgen z. B. in Form von Platten, Bechern, Spiralbändern u. a.). Bei allen Pflanzen sind die Chloroplasten in der Regel linsenförmig (Chlorophyllkörner).

Jeder Chloroplast enthält zahlreiche feine grüne Körnchen, die in eine farblose Eiweißmasse eingebettet sind. Die grünen Körnchen sind schichtweise aus Eiweiß und dem grünen Farbstoff Chlorophyll aufgebaut (Abb. 5).

Das Chlorophyllmolekül besteht im wesentlichen aus vier konzentrisch um ein Magnesiumatom angeordneten ringförmigen Kohlenstoffverbindungen, daran hängt als langer Schweif ein hochmolekularer Alkohol. Chlorophyll wird biochemisch nur wirksam, wenn es mit Eiweißkörpern in Verbindung tritt.

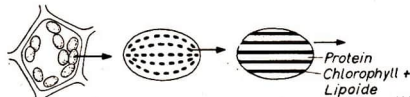


Abb. 5 Chloroplasten

Zusammenhang zwischen Eiweiß, Lipoiden und Chlorophyll

Zelle mit Chloroplasten

Chloroplast

chlorophyllhaltiges
Körnchen (Granum)

Innerhalb der Chloroplasten sind die chlorophyllhaltigen Körnchen die Träger der Photosynthese, in ihnen wird Zucker aus Kohlendioxyd und Wasser aufgebaut. In den benachbarten farblosen Eiweißschichten wird der Zucker in Assimilationsstärke umgewandelt.

Leukoplasten. Leukoplasten sind farblose Eiweißkörper, die sich vor allem in den nicht vom Licht getroffenen Teilen der Pflanze befinden. Sie bilden Speicherstärke und andere Reservestoffe. Manche Gruppen von Leukoplasten können sich bei Belichtung in Chloroplasten umwandeln.

Chromoplasten. Chromoplasten sind Eiweißkörper mit gelbroten lipoid- oder fettlöslichen Farbstoffen, den Karotinoiden. Sie färben zahlreiche Pflanzenteile gelb bis orangerot (Früchte der Tomaten, Blüten der Kapuzinerkresse, Möhnenwurzeln u. a.).

Mitochondrien. Mitochondrien sind kleine stäbchen-, hantel- oder wurmförmige Körperchen, an deren Aufbau Eiweiße, Fette und Lipide beteiligt sind. Ihre Größe schwankt zwischen 0,5 und 1,5 μm . Die Mitochondrien sind wichtige Zentren der Energieversorgung (Atmung) in der Zelle.

Zentralkörperchen. Das Zentralkörperchen ist ein kleines Körnchen in der Nähe des Zellkerns. Es kommt nur in tierischen Zellen vor und hat für die Zellteilung Bedeutung.

Zellplasma. Als Zellplasma bezeichnet man das gesamte Protoplasma der Zelle mit Ausnahme des Zellkerns und der Plastiden. Das Zellplasma enthält als lebende Einschlüsse zum Beispiel Mitochondrien und Zentralkörperchen. Die Grundmasse des Zellplasmas ist im Lichtmikroskop durchscheinend, ohne besondere Merkmale.

Alle Bestandteile der Zelle stehen miteinander in enger Beziehung. Sie können allein auf die Dauer nicht existieren. Alle lebenden Teile wirken zusammen; sie bilden bei weitgehender Differenzierung ein Ganzes.

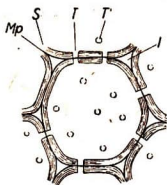


Abb. 6 Bau der Zellwand
 I Interzellulare, Mp Mittellamelle und primäre Wand,
 S sekundäre, geschichtete Wand, T Tüpfel, T' Tüpfel einer unteren Zellwand (Flächenansicht)

Die Zellwand. Feste Zellwände besitzen nur die Algen, Pilze, Moose und Sproßpflanzen; sie fehlen im gesamten Tierreich. Die Zellwand wird vom Zellplasma gebildet. Ihr Aufbau vollzieht sich in drei Stufen (Abb. 6).

Mittellamelle. Junge Pflanzenzellen, die durch Zellteilung neu entstanden sind, werden zunächst durch eine äußerst dünne Wand aus Pektinstoffen (Mittellamelle) getrennt. (Pektinstoffe sind wie die Kohlenhydrate aufgebaut, sie besitzen jedoch andere Grundbausteine.)

Primärwand. Auf die Mittellamelle wird beiderseits eine dünne Zelluloseschicht aufgelagert, die Primärwand. Sie besteht aus einem lockeren, weitmaschigen Netz wirt nach allen Seiten verwobener Zellulosefasern, dessen Maschen mit Wasser, Zellplasma und anderen Stoffen gefüllt sind. Die Primärwände sind noch äußerst dehnbar und formbar; sie bilden die Wand der noch wachsenden Zellen.

Sekundärwand. Wenn die Pflanzenzellen ausgewachsen sind, werden auf die Primärwand mehr oder weniger dicke Schichten von dichtgelagerten Zellulosefasern aufgelagert. Diese festen Sekundärwände verleihen der ganzen Zellwand ihr starres Gefüge.

Unverdickt gebliebene Stellen der Zellwand, die Tüpfel, sichern die Verbindung des Protoplasmas von Zelle zu Zelle.

Die Pektinmittellamellen bilden die Kittsubstanz, die die Zellulosewände der Pflanzenzellen zusammenhält.

Durch Kochen, Säurebehandlung und manche Wirkstoffe lassen sich Pektinstoffe auflösen. Außerdem werden sie von zahlreichen Pilzen oder Bakterien angegriffen. Als Folge davon fallen die Zellen auseinander, und die betreffenden Pflanzenteile werden weich, breiig oder mehlig (Mehligwerden gekochter Kartoffeln, Lockerung der Flachs- oder Hanffasern bei der Rotte).

In die Zellulosewände können noch zusätzlich Stoffe eingelagert werden. Sind die Lücken zwischen den Zellulosefasern beispielsweise mit Korkstoff ausgefüllt, so sind die Zellwände praktisch wasserundurchlässig (Borke der Bäume). Im Holzkörper sind die Zellulosefasern dagegen in eine Masse von Holzstoff (Lignin) eingebettet; so entsteht ein dauerhafter, druck- und zugfester Holzkörper. Zellwände können auch noch mit Gerb- oder Farbstoffen imprägniert sein.

Einschlüsse. In der Zelle sind noch andere nichtlebende Bestandteile eingeschlossen.

Reservestoffe. Stärke, Glykogen, Fette, zum Teil auch Eiweiße und zahlreiche andere Substanzen werden als Vorratsstoffe in Form kleiner Körnchen im Zellplasma gespeichert.

Kristalle. Kristalle, meist aus Calciumoxalat, finden sich in vielen Pflanzenzellen. Sie haben keine besondere Funktion. Kristalle entstehen als unlöslicher Niederschlag, wenn Calciumionen, die mit dem aufgenommenen Bodenwasser in die Pflanzenzellen gelangen, mit der Oxalsäure des Zellsaftes zusammentreffen.

Tierische und pflanzliche Zellen. Der Zellkern und das Zellplasma mit den verschiedenen lebenden Bestandteilen sind im wesentlichen bei Pflanzen und Tieren gleich gestaltet. Trotzdem gibt es Unterschiede zwischen Pflanzen- und Tierzellen (Abb. 2 u. 3).

Im Gegensatz zu den Pflanzenzellen besitzen die tierischen Zellen keine Plastiden und nur selten Vakuolen. Sie sind nicht in der Lage, organische Verbindungen aus anorganischen aufzubauen. Tierische Zellen haben außerdem keine Zellwand, sie sind elastischer als die Pflanzenzellen. Das bedingt weitgehende Unterschiede im Bau pflanzlicher und tierischer Organismen (Stützsystem!).

Zellvermehrung

Vermehrung der Zellsubstanz. Die lebenden Bestandteile einer Zelle sind niemals in Ruhe; sie werden dauernd chemisch verändert, ihre Atome und Moleküle werden ständig ausgetauscht und erneuert. Durch diese Lebensvorgänge wird, besonders in jungen Zellen, auch die Substanz der Eiweißkörper fortlaufend erneuert und vermehrt (Selbstreproduktion der lebenden Materie). Hierbei spielen die Nukleinsäuren der Nukleoproteide die entscheidende Rolle.

Nukleinsäuren sind hochmolekulare Stoffe, die eine den Proteinen sehr ähnliche Struktur besitzen. Sie bestehen aus Molekülen von Phosphorsäure, einer Pentose und einer anderen organischen Verbindung.

Der den Proteinen sehr ähnliche Aufbau und die elektrochemischen Eigenschaften der Nukleinsäuren bewirken, daß sich an ihnen die einfachen Eiweißbausteine (Aminosäuren, niedermolekulare Peptide) immer wieder zu den gleichen, für die jeweilige Zelle typischen Eiweißkörpern zusammenfügen.

Sehr stark vereinfacht müßte man sich die Nukleinsäuren als eine Art chemischer „Gußform“ vorstellen, nach deren Muster sich die Eiweißbausteine zu immer derselben Anordnung zusammenlagern.

Zellteilung. Die lebenden Bestandteile der Zelle — Zellkern, Zellplasma mit seinen Sonderbildungen und Plastiden — stehen miteinander in einem ganz bestimmten, ausgewogenen Größen- und Massenverhältnis, das einen reibungslosen und raschen Ablauf der Lebensvorgänge gewährleistet. Die ständige Neuproduktion von lebender Substanz in allen Bestandteilen der Zelle führt zu einer Teilung der Zellen, sobald die Zunahme ihrer lebenden Substanz einen bestimmten Grad erreicht hat. In wenig differenzierten Zellen verläuft die Zellteilung relativ einfach. Organismen, bei denen die Hauptmasse der Nukleoproteide noch nicht zu einem Zellkern vereinigt, sondern annähernd gleichmäßig im Protoplasma verteilt ist, spalten sich in zwei Hälften (Bakterien, Blaualgen).

Bei stärker differenzierten Zellen, wie wir sie bei allen kernhaltigen Lebewesen finden, verläuft die Teilung weitaus komplizierter. Hier finden wir verschiedene Arten von Teilungsvorgängen.

Die Substanz des Zellplasmas wird ohne äußerlich sichtbare Vorgänge fortlaufend erneuert und vermehrt. Plastiden und Mitochondrien teilen und vermehren sich selbständig, indem sie sich in der Mitte durchschnüren.

Der Zellkern mit seinen Nukleoproteiden, die für das Vererbungsgeschehen von großer Bedeutung sind, teilt sich in einem besonders komplizierten Vorgang.

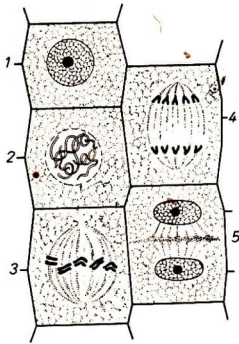


Abb. 7 Kernteilung (Mitose)

1 Ruhekern; 2 Prophase: die Chromosomen werden als lange, oft schon gespaltene Fäden sichtbar; 3 Metaphase: die in je zwei Längshälften (Chromatiden) gespaltenen Chromosomen ordnen sich in der Zellmitte in einer Äquatorialplatte, es bildet sich ein spindelartiges Fasernetz; 4 Anaphase: die beiden Hälften jedes Chromosoms werden von den sich verkürzenden Spindelfäden nach den entgegengesetzten Polen der Zelle gezogen; 5 Telophase: die Chromatiden sind wieder zu Chromosomen geworden, die unter Wasseraufnahme verquellen und einen neuen Ruhekern bilden.

Kernteilung (Mitose). Die Teilung des Zellkerns verläuft in vier Stufen (Abb. 7).

Bei der Kernteilung erhalten beide Tochterzellen die gleiche Anzahl von Chromosomen; durch die genaue Längsteilung der Chromosomen werden auch sämtliche Chromomeren halbiert und gelangen zu gleichen Teilen in die Tochterzellen.

Diese Art der Kernteilung verläuft bei Pflanzen und Tieren mit nur geringfügigen Unterschieden. So wird in der tierischen Zelle das Spindelnetz von Bestandteilen der Zentralkörperchen gebildet, bei Pflanzenzellen dagegen von Plasmabestandteilen in der Nähe des Zellkerns. Die Spindelfäden selbst sind faserartige Plasmafäden, die vorübergehend durch Entquellung entstehen, sich später aber wieder auflösen.

Amitose. Die oben beschriebene Form der Kernteilung tritt vor allem in jungen Zellen auf. Bei älteren Zellen (auch in Drüsengewebe und unter Einfluß von Krankheiten) schnürt sich die ganze Zelle einschließlich des Zellkerns ungefähr in der Mitte durch, ohne daß vorher Chromosomen gebildet werden. Diese Form der Zellteilung wird Amitose genannt.

Vielkernige Plasmagebilde. In der Regel folgt auf eine Kernteilung auch eine Zellteilung. Sie kann aber unterbleiben; dann entstehen vielkernige Riesenzellen (mehrkernige Gebilde können auch durch Reduktion der Zellwände entstehen).

Aus langen, schlauchförmigen, vielkernigen Zellen bestehen die Körper der Schlauchalgen sowie einfacher Pilze (Köpfchenschimmel, Wasserschimmel, Erreger der Kartoffelfäule u. a.). Auch die Zellen der quergestreiften Muskulatur bei den Wirbeltieren enthalten zahlreiche Kerne.

Differenzierung zwischen den Zellen — Gewebe

Einzeller und Vielzeller

Die Kernlosen (Bakterien, Blaualgen), zahlreiche Algen und Pilze sowie alle Ur tierchen bestehen aus nur einer Zelle; wir bezeichnen sie als Einzeller. Hier führt eine einzige Zelle sämtliche Lebensfunktionen aus.

Viele finden wir Einzeller zu Kolonien vereinigt. Sie entstehen oft dadurch, daß sich nach einer Zellteilung die Tochterzellen nicht voneinander lösen, sondern in einem

mehr oder weniger lockeren Verband vereinigt bleiben. Dieser Zellverband wird meist von einer gemeinsamen Schleim- oder Gallerthülle zusammengehalten. In diesen einfachen Kolonien sind aber die einzelnen Zellen in ihrer Lebensweise noch vollkommen selbständig.

Je mehr Einzelzellen sich zu Kolonien vereinigen, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, daß sie sich gegenseitig beeinflussen, teils behindern, teils fördern. Bei manchen Kolonien tritt das Protoplasma der einzelnen Zellen miteinander in Verbindung. Schließlich beginnt zwischen den Zellen einer Kolonie eine ähnliche Arbeitsteilung wie ursprünglich zwischen den Bestandteilen innerhalb der Zellen.

Bei den aus 16 Zellen bestehenden grünen Geißelträgerkolonien der Gattung *Pandorina* (Abb. 8) sind noch alle Zellen gleichwertig und unabhängig voneinander. Jede Zelle kann die Kolonie verlassen und selbständig weiterleben.

Bei der aus 32 Zellen bestehenden Kolonie *Eudorina* dagegen (Abb. 9) finden wir schon kleine Zellen mit großem Augenfleck und geringer Teilungsgeschwindigkeit sowie große Zellen mit kleinem Augenfleck und hoher Teilungsgeschwindigkeit. Damit wird die Kolonie unsymmetrisch, manche Zellen dienen vorwiegend der Bewegung, andere der Fortpflanzung der Kolonie.

Bei der Kugelalge *Volvox* sind bis über 10000 Zellen zu einem Verband zusammengeschlossen. Die außen gelegenen Zellen, die alle über Plasmabrücken miteinander in Verbindung stehen, übernehmen die Ernährung, Fortbewegung und Reaktion auf Umweltreize, die innen gelegenen Zellgruppen dagegen die Vermehrung. Damit aber sind die Zellen dieses Verbandes nicht mehr unabhängig voneinander, sie bleiben aufeinander angewiesen und ergänzen einander bei der Durchführung der Lebensfunktionen. Aus den vielen Zellen einer Kolonie ist ein vielzelliger Organismus geworden.

Die Differenzierung der Zellen bei den vielzelligen Lebewesen hatte zwei tiefgreifende Folgen für die Entwicklung des Lebens auf der Erde.

Die Spezialisierung einzelner Zellen und Zellgruppen auf bestimmte Lebensfunktionen schuf die Voraussetzung für höhere Leistungen. Die Vielseitigkeit der Lebensäußerungen, die hervorragende Anpassung der Lebewesen an die verschiedensten und schwierigsten Lebensbedingungen, die großen Leistungen der Pflanzen, Tiere und des Menschen sind ohne eine hochgradige Spezialisierung ihrer Körperzellen nicht denkbar. Jede gesteigerte Leistung im Bereich des Lebens wurde erst möglich nach gesteigerter und verfeinerter Spezialisierung der Zellen.

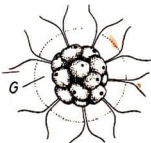


Abb. 8 Zellkolonie (*Pandorina*). G Gallerthülle

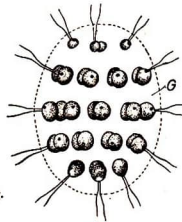


Abb. 9 Vielzeller (*Eudorina*) mit beginnender Zelldifferenzierung. G Gallerthülle

Sobald die Zellen sich auf bestimmte Lebensfunktionen spezialisieren, verlieren sie die Fähigkeit, auch alle anderen Lebensfunktionen auszuüben. Meist verlieren sie ihre Teilungsfähigkeit; sie können sich nicht mehr vermehren und müssen eines Tages an Überalterung sterben.

Einzelne Zellen oder Zellgruppen behalten ihre Fähigkeit, wieder einen ganzen Organismus zu bilden. Diese Zellen übernehmen dann als Fortpflanzungszellen die Vermehrung der Organismen.

Die Differenzierung der Zellen vielzelliger Organismen erfolgte in der Entwicklungsgeschichte der Lebewesen nicht plötzlich, sondern vollzog sich langsam und wurde allmählich immer vollkommener.

So ist bei den vielzelligen Protisten die Differenzierung noch unvollkommen, wir finden alle Übergänge von kleinen, wenigzelligen, echten Kolonien bis zu sehr weitgehender Spezialisierung bei den großen Meeresalgen. Eine scharfe Trennung besteht aber auch hier in der Regel zwischen den Zellen, die nur der Vermehrung dienen, und solchen Zellen, die alle übrigen (vegetativen) Lebensfunktionen ausüben.

Bei den Pflanzen und den Tieren sind auch die vegetativen Funktionen auf spezialisierte Zellgruppen verteilt — ihre Körper bestehen aus Geweben.

Gewebe sind Verbände spezialisierter Zellen mit gleichem Bau und gleicher Lebensfunktion.

Aufgaben und Fragen

1. Erläutern Sie die Unterschiede zwischen einem vielzelligen Einzelwesen und einer Kolonie einzelner Zellen!
2. Die meisten Zellen nehmen Kugelgestalt an, wenn sie nicht mit anderen Zellen in Berührung stehen. Erklären Sie!
3. Warum kann man bei mikroskopischer Betrachtung nur wenig über den Aufbau des Protoplasmas in lebenden Zellen erfahren?
4. Wann kann man am besten die Chromosomen einer Zelle zählen? In welcher Ebene muß man dazu die Zelle schneiden?
5. Nennen Sie das wichtigste Unterscheidungsmerkmal zwischen lebenden Organismen und nichtlebenden Objekten!

Stoffwechsel

Vom gesamten Organismus wie auch von jeder einzelnen Zelle werden ständig Substanzen als Nährstoffe aus der Umgebung aufgenommen und verarbeitet. Abfallprodukte und Abbauprodukte werden nach außen abgeschieden.

Die Gesamtheit der chemischen und physikalischen Prozesse in einem lebenden Organismus nennt man **Stoffwechsel**.

Je nach Verwendung der Stoffe im Organismus unterscheidet man **Baustoffwechsel** und **Betriebsstoffwechsel**.

Baustoffwechsel (Ernährungsstoffwechsel). Baustoffversorgung der Organismen. — Die aufgenommenen Nährstoffe werden zu Bestandteilen des lebenden Körpers verarbeitet.

Betriebsstoffwechsel (Leistungsstoffwechsel). Energieversorgung der Organismen. — Die für den Aufbau des lebenden Körpers und für die Aufrechterhaltung der ständigen chemisch-physikalischen Veränderungen notwendige Energie wird durch den chemischen Abbau bestimmter Betriebsstoffe im Körper erzeugt.

Baustoffwechsel und Betriebsstoffwechsel lassen sich nicht scharf trennen, sie hängen miteinander zusammen und greifen ineinander.

Der Stoffwechsel besteht aus einer Vielzahl chemischer Einzelreaktionen, die genau aufeinander abgestimmt sind. Störungen in diesem komplizierten Gefüge — mögen sie die Nährstoffzufuhr, den Verarbeitungsprozeß oder die Ausscheidung der Endprodukte betreffen — führen zu abweichenden Lebenserscheinungen (Krankheiten). Schwere Eingriffe in das Stoffwechselfgeschehen oder längere Unterbrechungen des Stoffwechsels zerstören das Leben.

Der Stoffwechsel ist ein wesentliches Kennzeichen des Lebens. Das Aufhören des Stoffwechsels bedeutet den Tod.

Die Geschwindigkeit der Stoffwechselfvorgänge ist innerhalb weiter Grenzen veränderlich. Bei gesteigerter Lebenstätigkeit (z. B. Jugendwachstum, Vermehrung) erfolgt bei vielen Stoffwechselfprozessen ein hoher Stoffumsatz. Je langsamer die Stoffwechselfprozesse ablaufen, desto träger sind die Reaktionen des Organismus. In vielen Fällen kommt es periodisch oder unter dem Einfluß ungünstiger Umweltbedingungen (Kälte, Dürre o. ä.) zu einem Ruhezustand von Organen oder Organteilen (Samenruhe, Kältestarre, Trockenstarre, Dauersporen, Dauerzysten u. a.). Dann verlaufen die Stoffwechselfvorgänge derart langsam, daß sie scheinbar aufgehört haben und nur mit sehr feinen Meßmethoden nachweisbar sind. In diesem Zustand sind die Lebewesen äußerst widerstandsfähig gegen alle ungünstigen Umwelteinflüsse.

Jede Organismenart hat einen ihr eigentümlichen Stoffwechsel, der ihrer besonderen Lebensweise und ihren charakteristischen Merkmalen entspricht. Bei nahe verwandten

Lebewesen zeigt der Stoffwechsel sehr viele gemeinsame Züge. Darüber hinaus hat die Wissenschaft beim tieferen Eindringen in die Zusammenhänge der Stoffwechselprozesse festgestellt, daß die Hauptlebensvorgänge (z. B. Auf- und Abbau der wichtigsten organischen Stoffe) in allen Organismen — bei Kernlosen, Protisten, Pflanzen, Tieren und Menschen — in grundsätzlich gleicher Weise ablaufen. Dies ist ein Beweis, daß alles Leben auf der Erde auf gemeinsame Urformen zurückgeht. Diese Urformen des Lebens bildeten sich sicherlich im Urmeer. Wasser ist bis heute unentbehrliche Voraussetzung für jedes Leben geblieben.

Grundlage aller Lebensvorgänge sind chemisch-physikalische Prozesse in wäßriger Umgebung. Wasser ist an sämtlichen Stoffwechselfvorgängen direkt oder indirekt entscheidend beteiligt.

Die Bedeutung des Wassers für das Leben

Lösungs- und Quellungsmittel. Fast alle lebenswichtigen organischen und anorganischen Stoffe sind entweder in Wasser löslich oder zeigen eine sehr große Anziehungskraft für Wassermoleküle. Eine wesentliche Ursache hierfür ist der Dipolcharakter der Wassermoleküle.



Im Wassermolekül sind die beiden Wasserstoffatome und das Sauerstoffatom in einem Winkel von etwa 105° angeordnet. Dadurch entsteht im Molekül ein negativer Pol am Sauerstoffatom und ein positiver Pol an den beiden Wasserstoffatomen.

Aus dieser Molekülstruktur leiten sich die Eigenschaften des Wassers ab, die von großer physiologischer Bedeutung sind:

Hohe Wärmekapazität. Wasser hat von allen Flüssigkeiten (ausgenommen Ammoniak) das größte Wärmespeichungsvermögen; es kann sehr viel Wärme aufnehmen, bevor seine Temperatur steigt. Dadurch besitzen alle wasserhaltigen Körper einen gewissen Schutz gegen Überhitzung.

Blätter nehmen in der prallen Sonne sehr viel Wärme auf. Trotzdem steigen die Innentemperaturen der Zellen selten auf ein schädliches Maß an, weil das Zellwasser, besonders in dickfleischigen Organen, die Wärme aufnimmt.

Gute Wärmeleitfähigkeit. Im lebenden Körper entsteht selten eine örtliche Überhitzung, weil die entstehende Wärme rasch auf die benachbarten Zellen und Organe weitergeleitet wird (besonnte Blätter, arbeitender Muskel).

Hohe Verdampfungswärme. Beim Verdampfen von flüssigem Wasser wird sehr viel Wärme verbraucht (539 cal/g), die dem verdunstenden Körper entzogen wird. Dieser kühlt dabei ab. Die Transpiration wirkt daher kühlend; sie schützt vor einer Überhitzung der Zellen.

Hohe Schmelzwärme. Einem Eisblock muß sehr viel Wärme zugeführt werden, bis er aufgetaut ist (80 cal/g), eine entsprechende Wärmemenge wird frei, wenn Wasser gefriert.

Die Eisbildung verläuft nur langsam, weil gleichzeitig viel Wärme frei wird. Solange Wasser und Eis nebeneinander bestehen, kann die Temperatur nicht unter null Grad absinken. Selbst seichte Gewässer frieren daher nicht sofort zu.

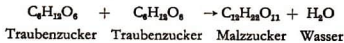
Größte Dichte bei 4°C . Wasser ist bei 4°C am schwersten; Eis ist leichter und schwimmt oben. Tiefe Gewässer frieren daher niemals bis auf den Grund zu; das Leben bleibt darin auch im Winter erhalten.

Transportmittel. Wasser ist Transportmittel für die am Stoffwechsel beteiligten Substanzen. Fast alle Stoffe, die in das Protoplasma der Zellen aufgenommen, durch die Zellen und im Organismus weitergeleitet oder ausgeschieden werden, müssen sich in wäßriger Lösung befinden. Im Zustand reger Stoffwechsellätigkeit ist daher der Wassergehalt der Zellen besonders hoch. Ruhezustände sind dagegen durch ausgeprägte Wasserarmut der Zellen gekennzeichnet.

Wasser als Bestandteil chemisch-physikalischer Stoffwechselprozesse. Wasser ist meist auch unmittelbar an den chemischen Umsetzungen im Körper beteiligt.

Beispiele:

a) Polykondensation: Aufbau von Malzzucker aus Traubenzucker



Häufig wird bei der Verkettung organischer Bauteile zu größeren Molekülen Wasser abgeschieden.

b) Hydrolyse: Spaltung von Malzzucker zu Traubenzucker



Bei der Spaltung großer Moleküle in ihre einfachen Bauteile wird Wasser verbraucht.

Die an den Lebensvorgängen beteiligten Stoffe sind stets in Wasser gelöst oder mit Wasser verbunden. Trifft das nicht mehr zu, so scheiden sie vorübergehend oder ständig aus dem Stoffwechsel aus. Solche Stoffe sind

Speicherstoffe (Stärke, Glykogen, Fett, Reserveeiweiß u. a.),

dauerhafte Zellstrukturen (Zellwand, Chitinhülle u. a.),

Ablagerungen innerhalb der Zelle — Einschlüsse — (Kristalle u. a.),

Abscheidungen außerhalb der Zelle (Kutikula der Pflanzen, Kalkschalen, ätherische Öle u. a.).

Wenn Speicherstoffe als Nährmaterial für die Zellen gebraucht werden, müssen sie erneut in wasserlösliche Formen umgewandelt werden.

In der Leber beispielsweise wird aus Traubenzucker das unlösliche Glykogen aufgebaut und gespeichert. Zur regelmäßigen Versorgung der Körperzellen mit Kohlenhydraten wird Glykogen bei Bedarf in der Leber wieder zu Traubenzucker abgebaut und in die Blutbahn abgegeben.

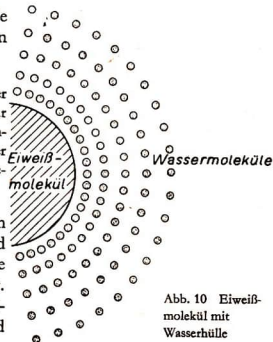


Abb. 10 Eiweißmolekül mit Wasserhülle

Allgemeine Bedeutung des Wassers. Die am Stoffwechsel beteiligten chemischen Elemente und Verbindungen können entweder selbst elektrische Ladungen tragen oder sind wie Dipole gebaut. Sie ziehen daher mit ihren Ladungen die entgegengesetzten Pole der Wassermoleküle an und

umgeben sich auf diese Weise mit einer Wasserhülle (Abb. 10). Daraus ergibt sich die hervorragende Eignung des Wassers als Lösungs- und Quellungsmittel im gesamten Stoffwechsel.

Wasser ist die typische Umgebung für die lebende Zelle geblieben, sie braucht heute wie vor Jahrmillionen diese wäßrige Umgebung, auch wenn die Organismen sich das trockene Land als Lebensstätte erobert haben. Landpflanzen und Landtiere, auch der Mensch, sind so gebaut, daß die Wasserversorgung ihrer lebenden Körperzellen gesichert ist.

Bei allen höheren Organismen wird durch besondere Einrichtungen ein ständiges Strömen des Wassers erreicht; bei Mensch und Tier durch das Kreislaufsystem (Herz), bei den Pflanzen durch das Gefäßsystem (Transpirationssog sowie Wurzeldruck). Dieser Wasserstrom dient auch dem Nährstofftransport über größere Strecken im Organismus. Stillstand oder Unterbrechung dieses Flüssigkeitsstromes führt zum Tode.

Die Wassermenge, die ein Organismus ohne Schaden verlieren kann, ist sehr unterschiedlich; sie richtet sich nach dem Grad der Anpassung an die Trockenheit. Der Mensch kann bis zu 11% seines Körperwassers verlieren (tritt nach etwa siebentägigem Dursten ein), von einem stärkeren Wasserverlust erholt er sich nicht mehr. Zarte Feuchtluftpflanzen ertragen bis zu 20% Wasserverlust (Busch-Windröschen), an Trockenheit angepaßte Gewächse (Wüsten- und Steppenpflanzen) dagegen bis zu 80%. Extreme Trockenlandpflanzen (manche Moose und Farne) und Flechten sowie manche Tierstämme (bestimmte Rädertierchen und Bärtierchen) können vollständig austrocknen. Trotzdem werden sie nach Befeuchten wieder lebensfähig. Hier wird der Stoffwechsel beim Eintrocknen auf das äußerste herabgesetzt.

Probleme des Überganges vom Wasser- zum Landleben. Die ersten Lebewesen mögen auf der Erde vor fast 3 Milliarden Jahren entstanden sein; die Wasserversorgung wurde jedoch erst vor etwa 400 Millionen Jahren zum Problem, als die ersten Pflanzen (Nacktsprosser) und Tiere das Festland zu besiedeln begannen. Dieser Schritt war einer der schwierigsten und folgenschwersten in der gesamten Entwicklung des Lebens auf der Erde. Er bedingte eine vollkommene Umstellung im Körperbau der Organismen. Nur wenige Sippen von Pflanzen und Tieren besaßen dazu die Voraussetzungen.

Für das Leben auf dem Lande waren die Bildung eines Verdunstungsschutzes und die Entwicklung von Stützgewebe erforderlich.

Verdunstungsschutz. Bei Pflanzen: Dichtes Abschlußgewebe mit Kutikula und Spaltöffnungen zur Regulierung der Verdunstung.

Bei Tieren: Dichte, wasserabweisende Außenhüllen, Chitinpanzer (Gliedertiere), Schalen oder Gehäuse (Weichtiere) oder eine vielschichtige, außen verhornte Oberhaut (Wirbeltiere) mit Hornschuppen, Federn oder Haaren.

Stützgewebe. Das Protoplasma besitzt annähernd die gleiche Dichte wie Wasser. Im Wasser werden daher die Körper der Lebewesen durch den Auftrieb getragen; sie können verhältnismäßig zart und weich gebaut sein. Beim Übergang auf das Land fällt die tragende Kraft des Wassers fort, die Körper würden unter ihrem eigenen Gewicht zusammenfallen, wenn nicht ein Stütz- oder Festigungsgewebe ihrem Körper Halt gäbe (Festigungsgewebe der Pflanzen, Stützskelett der Tiere).

Die hier erwähnten Beispiele sind nur eine sehr kleine Auswahl, sie zeigen aber die zentrale Bedeutung des Wassers für das Leben. Wir werden diese Bedeutung auch in den folgenden Abschnitten immer wieder erkennen.

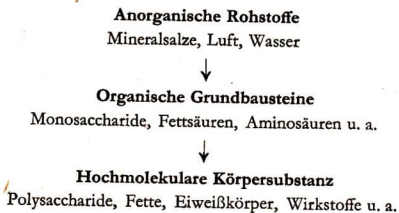
Baustoffwechsel

Jedes Lebewesen baut seinen Körper aus Nährstoffen auf, die es der Umgebung entnimmt. Ein Aufbau körpereigener Substanz aus körperfremden Stoffen wird allgemein Assimilation genannt.

Je nachdem, welche Stoffe in den Aufbau der Organismen einbezogen werden, unterscheidet man Kohlenstoffassimilation, Stickstoffassimilation und verschiedene Formen der Mineralstoffassimilation.

Die Körper der Organismen bestehen aus einer Vielzahl äußerst komplizierter chemischer Verbindungen (s. S. 7 ff.). Diese lassen sich aus wenigen einfachen organischen Grundbausteinen aufbauen, vor allem aus Monosacchariden, Fettsäuren und Aminosäuren. Beim Abbau dieser organischen Verbindungen entstehen in erster Linie Wasser, Kohlendioxyd und Ammoniak.

Der Aufbau lebender Stoffe (Assimilation)



Für das Verständnis aller Ernährungsprozesse ist folgendes wichtig:

Der Aufbau hochmolekularer Körpersubstanz ist mit verhältnismäßig geringem Energieaufwand durchführbar. Die dazu notwendigen Voraussetzungen sind bei allen Lebewesen vorhanden.

Der Aufbau der organischen Grundbausteine erfordert einen hohen Energieaufwand und ist meist nur mit Hilfe besonderer Zellbestandteile zu bewältigen, die nicht bei allen Organismen ausgebildet sind.

Alle lebenden Zellen und alle Organismen (vom einfachsten Bakterium bis zum Menschen) sind befähigt, ihren Körper aus organischen Grundbausteinen aufzubauen.

Die Mehrzahl aller Organismen ist bei der Nahrungsaufnahme auf organische Stoffe angewiesen, die von anderen Lebewesen gebildet wurden. Eine solche Ernährungsweise nennt man **heterotroph**.

Heterotroph leben: die Mehrzahl der Bakterien, die Urtierchen, sämtliche Pilze, chlorophyllfreie Pflanzen, alle Tiere, der Mensch.

Nur wenige Gruppen von Organismen sind in der Lage, ihre organischen Grundbausteine aus anorganischen Stoffen herzustellen. Diese Ernährungsweise nennt man **autotroph**.

Autotroph leben: einige Gruppen von Bakterien, fast alle Blaualgen, fast sämtliche Algen, alle grünen Pflanzen. Sie bauen aus anorganischen Verbindungen organische auf.

Aber auch diese Organismen sind zu heterotropher Lebensweise fähig, bei den Vielzellern muß sich sogar ein großer Teil der Zellen von organischen Stoffen ernähren. Alle chlorophyllfreien Zellen und Pflanzenteile (z. B. Wurzeln, Leitgewebe, Stengelinneres) sind auf die Zufuhr organischer Nährstoffe angewiesen. Auch keimende Jungpflanzen, deren Chlorophyll noch nicht fertig entwickelt ist, ernähren sich von den organischen Reservestoffen (vor allem von Stärke und Eiweiß), die im Samen oder in den unterirdischen Speicherorganen (Wurzelstock, Zwiebel, Knolle, Rübenwurzel) enthalten sind.

Die Tatsache, daß alle Lebewesen heterotroph leben können, aber nur wenige Gruppen zur autotrophen Ernährung befähigt sind, deutet darauf hin, daß die heterotrophe Lebensweise erdgeschichtlich älter ist als die autotrophe und bei der Entstehung des Lebens auf der Erde die allgemeine Ernährungsweise der Uroorganismen darstellte.

Da die Mehrzahl der Organismen heterotroph lebt, wäre der Vorrat an organischem Nährmaterial sehr bald aufgebraucht, wenn nicht durch die Tätigkeit der autotrophen Organismen immer wieder neue Vorräte an organischen Nährstoffen gebildet würden.

Die Leistung der autotrophen Lebewesen, insbesondere der Meeresalgen und der grünen Pflanzen, bildet somit heute die Voraussetzung für die Erhaltung des gesamten Lebens auf der Erde.

Autotrophe Ernährungsweise

Der Kohlenstoff ist für den Aufbau der lebenden Substanz unentbehrlich. Die **Kohlenstoffassimilation** kann durch Photosynthese oder durch Chemosynthese erfolgen.

Ablauf der Photosynthese

Die Photosynthese ist der am weitesten verbreitete und grundlegende Vorgang der autotrophen Kohlenstoffassimilation in der Natur.

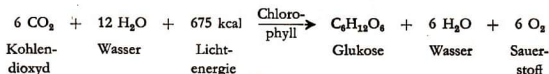
Biochemischer Vorgang. Wir wissen bereits, daß bei der Photosynthese in den grünen Pflanzen aus Kohlendioxyd und Wasser Kohlenhydrate, vor allem Traubenzucker, aufgebaut werden. Die notwendige Energie liefert das Sonnenlicht. Wirkstoff ist das Chlorophyll, dessen Anwesenheit unbedingt erforderlich ist; es wird aber bei diesem Prozeß nicht verbraucht. Als Nebenprodukt wird Sauerstoff freigesetzt und an die Luft abgegeben.

Schon seit langem ist bekannt, daß es sich bei diesem Vorgang nicht um eine direkte, einfache chemische Verbindung zwischen den Molekülen des Kohlendioxyds und des Wassers handelt. Jahrzehntelange angestrengte Forschungen in vielen Ländern waren jedoch nötig, bis die sehr komplizierten Wege gefunden wurden, die zu diesem Aufbau von Zucker führen.

Die Untersuchungen wurden vor allem an Kulturen der einzelligen Grünalgen *Chlorella* und *Scenedesmus* vorgenommen. Bedeutende Erkenntnisse wurden durch den Einsatz radioaktiver Isotope ge-

wonnen. Mit Hilfe von radioaktivem Sauerstoff O^{18} im zugeführten Wasser konnte ermittelt werden, daß der bei der Photosynthese freiwerdende Sauerstoff aus dem Wasser stammt. Die Verwendung von Kohlendioxyd mit radioaktivem Kohlenstoff C^{14} gab die Möglichkeit, den Weg des Kohlenstoffs bei den komplizierten chemischen Umsetzungen im Protoplasma zu verfolgen. Heute besitzt die Wissenschaft eine gute Übersicht über die Gesamtvorgänge, wenn auch zahlreiche Einzelheiten noch näher erforscht werden müssen.

Die Photosynthese umfaßt eine Vielzahl kettenförmig ineinandergreifender chemischer Prozesse. Berücksichtigt man nur die Ausgangsstoffe und die Endprodukte, so läßt sich das Gesamtgeschehen mit folgender Formel wiedergeben:



Diese Formel sagt noch nichts über den Verlauf der Reaktion aus. Es bleiben vor allem noch folgende Fragen offen:

Wie greift das Licht als Energiequelle ein? Welche Rolle spielt das Chlorophyll? Wie werden Kohlendioxyd und Wasser, die in der nichtlebenden Natur miteinander nur Kohlensäure ergeben, hier zu Zucker zusammengefügt?

Der Vorgang der Photosynthese verläuft in zwei aufeinanderfolgenden Stufen, einer Lichtreaktion und einer Dunkelreaktion.

Lichtreaktion. Ein Teil der Energie des Sonnenlichts wird vom Chlorophyll aufgefangen und in chemische Energie umgewandelt. Mit ihrer Hilfe werden die dem Chlorophyll benachbarten Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die chemische Energie ist dann in den Wasserstoffionen als Reduktionsenergie enthalten.

Aus je 12 Wassermolekülen entstehen auf diese Weise 24 energiegeladene Wasserstoffatome; die 12 Sauerstoffatome verbinden sich zu 6 Molekülen Sauerstoff, der als Gas in die Umgebung entweicht.

Dieser hier vereinfacht dargestellte Vorgang verläuft genauer in folgender Weise: Aus Wassermolekülen werden zunächst Wasserstoffhydroxylionen (OH^-) abgespalten. Aus 24 Wassermolekülen entstehen so 24 Wasserstoffionen und 24 Hydroxylionen, die über 12 Moleküle H_2O_2 in 12 Moleküle Wasser (H_2O) und 6 Moleküle Sauerstoff (O_2) umgewandelt werden. Dieser Sauerstoff wird gasförmig an die Luft abgegeben. Da auch aus den weiteren Reaktionen der 24 Wasserstoffionen noch 6 Moleküle Wasser entstehen (siehe unten), werden in der Gesamtgleichung der Reaktion nur 6 Moleküle H_2O tatsächlich verbraucht.

Die Einwirkung des Sonnenlichts und die Mithilfe des Chlorophylls bei der Photosynthese beschränken sich nach heutigem Wissen auf die Spaltung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff (Photolyse), wobei die Energie des Sonnenlichtes zum Teil als Reduktionsenergie in die entstehenden Wasserstoffionen übergeht.

Dunkelreaktion. Das Kohlendioxyd wird zunächst an organische Zwischenträgerstoffe gebunden und unterliegt in dieser Form der chemischen Reduktion durch die bei der Lichtreaktion gebildeten Wasserstoffionen. In einer Reihe sehr komplizierter chemischer Umwandlungsprozesse, an denen weder Licht noch Chlorophyll beteiligt

phylls durch die Wasserspaltung in chemische Energie umgewandelt, die über die energiereichen Wasserstoffionen im weiteren Stoffwechsel wirksam wird.

Photosynthese bei Bakterien. Einige Sippen von Bakterien enthalten ein Chlorophyll, das dem der Pflanzen sehr ähnlich ist. Zuweilen werden diese grünen Farbstoffe durch purpurrote Farbstoffe überdeckt (Purpurbakterien).

Bei diesen Bakterien verläuft die Lichtreaktion der Photosynthese etwas anders. Sie entnehmen den notwendigen Wasserstoff nicht dem Wasser, sondern dem Schwefelwasserstoff. Die Umsetzung erfolgt nach folgender Gleichung:



Als Produkt der Spaltung von Schwefelwasserstoff wird reiner Schwefel abgeschieden, der von anderen Bakteriengruppen meist sofort zu Schwefelsäure oxydiert wird.

Schwefelwasserstoff entsteht in der Natur beim Faulen von Eiweißstoffen, vor allem in seichten, stehenden, sauerstoffarmen Gewässern, wo sich aus den Resten abgestorbener Pflanzen und Tiere ein schwarzer, übelriechender Faulschlamm bildet.

Stoffproduktion und Umwelt

Die chemische Gleichung für die Photosynthese enthält vier Größen, die das Ergebnis dieses Vorgangs bestimmen: Kohlendioxyd, Wasser, Licht und Chlorophyll. Außerdem ist die Photosynthese, so wie jeder chemische Prozeß, von der Temperatur abhängig.

Chlorophyll. Chlorophyll ist in den grünen Pflanzen überreichlich vorhanden. Ein Nachlassen der photosynthetischen Leistung ist in der Regel nicht auf einen Mangel an Chlorophyll zurückzuführen.

Das Chlorophyll kann nur im Verband mit lebendem Eiweiß (z. B. Plastideneiweiß) an der Stoffproduktion mitwirken. Wird das Eiweiß abgetötet (z. B. in siedendem Wasser oder Alkohol), so ist in einem Blatt keine Photosynthese mehr möglich.

Wasser. Wasser steht den assimilierenden Zellen meist ebenfalls reichlich als Baustoff zur Verfügung. Die Grundgewebe, in deren Zellen die Photosynthese stattfindet, haben einen Wassergehalt von etwa 90%.

Kohlendioxyd. CO_2 ist nur zu etwa 0,03% in der Luft enthalten. Die Blattzellen können weit mehr Kohlendioxyd verarbeiten, als ihnen in der Atmosphäre zur Verfügung steht. Eine künstliche Steigerung des Kohlendioxydanteils in der Luft führt daher stets zu einer verstärkten Assimilation.

In Mistbeeten kommt es zu einer CO_2 -Anreicherung. Die im stark gedüngten Boden der Frühbeete vorhandenen Bakterienmassen atmen sehr viel Kohlendioxyd aus, das durch die niedrigen Glasdächer in Bodennähe gehalten wird. Es kann von den Jungpflanzen aufgenommen werden, die dadurch besonders gut gedeihen. Die Atmungswärme der Bodenbakterien schafft gleichzeitig eine für das Wachstum günstige Temperatur.

In der Nähe von Industriebetrieben werden Gemüsebaugroßanlagen zur Versorgung der Bevölkerung errichtet. Das in der Industrie als Verbrennungsprodukt anfallende Kohlendioxyd wird durch Röhren in große Gewächshäuser geleitet; es dient als Nährstoff für die Pflanzen. Die besten Erträge wurden

bisher bei einem Kohlendioxydgehalt der Luft von etwa 0,1% erreicht. Eine übermäßig starke Anreicherung von CO_2 (mehr als 1%) wirkt giftig und hemmt die Entwicklung der Pflanzen.

Untergetauchte Wasserpflanzen nehmen das im Wasser gelöste Kohlendioxyd als Nährstoff für die Photosynthese auf.

Bei den Landpflanzen dringt das Kohlendioxyd durch die Spaltöffnungen in das Innere der Blätter ein; auf dem gleichen Weg werden Wasser und Sauerstoff abgegeben. Das kann sich unter Umständen sehr ungünstig auswirken. Wenn sich die Spaltöffnungen der Pflanze bei Trockenheit schließen, so daß eine zu starke Verdunstung verhindert wird, ist damit auch die Zufuhr des Kohlendioxyds vermindert und der Aufbau von Kohlenhydraten eingestellt, obwohl alle übrigen Voraussetzungen für die Photosynthese gegeben sind. Das ist eines der zahlreichen Beispiele, die zeigen, daß in der Natur keineswegs alles „weise“ und „zweckmäßig“ eingerichtet ist, wie es eine idealistische Naturbetrachtung zu erkennen glaubte.

Licht. Wechselnde Lichtstärke und Lichtzusammensetzung kann gleichfalls die photosynthetische Leistung der Pflanzen merklich verändern.

Das Licht wird vom Chlorophyll aufgenommen (absorbiert) und in Form von chemischer Energie zur Spaltung des Wassers verwendet. Das Chlorophyllmolekül verwendet jedoch nur einen geringen Teil der eingestrahnten Lichtenergie (etwa 3 bis 5%) und entnimmt daraus vor allem die langwelligen gelbroten und die kurzwelligen blauvioletten Strahlen. Die gelben bis grünen Anteile des Sonnenlichtes bleiben dagegen weitgehend ungenutzt (Abb. 12).

Sonnen- und Schattenpflanzen. Von den Blättern eines Baumes erhalten nur die am Kronenrand gelegenen das volle Sonnenlicht, in das Innere der Krone dringen meist nur Bruchteile des Tageslichts. Ebenso wird in einem geschlossenen Wald nur das Kronendach voll bestrahlt, auf den Waldboden gelangt im Durchschnitt nur etwa ein Hundertstel der vollen Lichtstärke. Die beschatteten Blätter und

Pflanzen sind diesem geringen Lichteinfall angepaßt (sie zeigen meist besondere Merkmale).

Sonnen- und Schattenblätter unterscheiden sich vor allem durch die Dicke ihrer Palisadenschicht (Abb. 13). Weil starkes Licht tiefer in die Blätter eindringen kann, sind die Palisadenzellen der Sonnenblätter langgestreckt und liegen oft in mehreren Reihen hintereinander. Die Chloroplasten sind über die Tiefe des Blattrahmens verteilt; sie werden in der Mehrzahl nicht direkt den Lichtstrahlen ausgesetzt. Da starkes Licht das

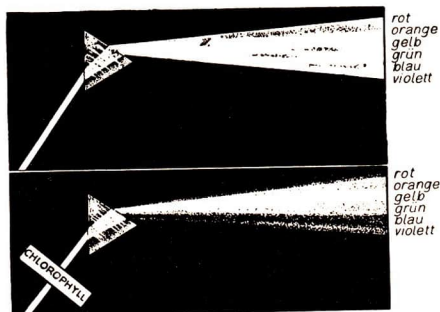


Abb. 12 Ausnutzung des Lichtes durch das Chlorophyll

Chlorophyll zerstört, ist diese Verteilung von Vorteil. Die Schattenblätter sind dünner und haben ihre Chloroplasten in kurzen Palisadenzellen flach unter der Blattoberfläche ausgebreitet, so daß das spärliche Licht voll ausgenutzt werden kann.

Sonnen- und Schattenpflanzen können das zugeführte Licht in verschiedener Weise nützen. Abbildung 14 zeigt, daß die Schattenpflanzen ihre Stoffproduktion mit einem geringeren Lichtangebot beginnen können als die Sonnenpflanzen. Sonnenpflanzen assimilieren erst bei stärkerem Licht mit einem Stoffgewinn. Mit zunehmender Lichtstärke steigt die Produktionsleistung jedoch bei ihnen wesentlich höher an als bei den Schattenpflanzen. Die höchstmögliche Produktionsleistung wird dort bereits bei etwa 10% des vollen Tageslichts erreicht; größere Lichtmengen steigern die Photosynthese nicht mehr. Schattenpflanzen können starkes Licht nicht nutzen.

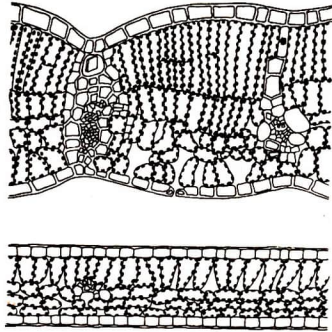


Abb. 13 Blattquerschnitte.
Oben: Lichtblatt;
unten: Schattenblatt

Temperatur. Die biochemischen Vorgänge der Photosynthese werden, wie alle chemischen Prozesse, auch von der Temperatur beeinflusst. Die Assimilationstätigkeit beginnt in der Regel bei einer gewissen Mindesttemperatur, dem Minimum, sie nimmt mit steigender Temperatur zu und erreicht schließlich das Optimum. Wird diese günstigste Temperatur überschritten, so fällt die Produktionsleistung wieder ab, bis

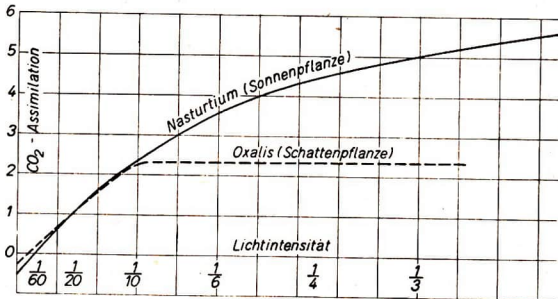


Abb. 14 Abhängigkeit des CO_2 -Verbrauchs von der Lichtstärke (Nasturtium = Brunnenkresse, Oxalis = Sauerklee)

bei Überschreitung des Temperaturmaximums eine Lähmung der Photosynthese einsetzt. Die Temperaturgrenzen schwanken je nach Klima und Art.

Bei der Mehrzahl unserer heimischen Pflanzen liegt das Temperaturminimum etwa bei 0 °C, in den tropischen und subtropischen Gebieten bei 5 °C. Pflanzen der Polargebiete und des Hochgebirges assimilieren dagegen noch bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt. Das Temperaturoptimum der Photosynthese liegt meist zwischen 20 °C und 30 °C, das Maximum zwischen 35 °C und 50 °C. Im allgemeinen wird die Photosynthese bei Temperaturen über 30 °C schon merklich geschwächt.

Bedeutung der Photosynthese

Die grünen Pflanzen wandeln jährlich etwa 1300 kg Kohlenstoff je Hektar in Kohlenhydrate um, das bedeutet etwa 20 Milliarden Tonnen für die ganze Erde. Noch weit größer ist die Leistung der Meeresalgen; sie trägt etwa 155 Milliarden Tonnen. Insgesamt werden somit 150 bis 200 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, das sind 550 bis 750 Milliarden Tonnen Kohlendioxyd, alljährlich auf der Erde in Kohlenhydrate umgesetzt. Das ist mehr als das Zwanzigfache dessen, was von Industrie und Haushalten an Kohlenstoff in Form von Kohle oder Erdöl benötigt wird. Dabei werden aber insgesamt nur etwa 3% des Kohlendioxyds der Atmosphäre und nur 0,3% des im Ozean gelösten Kohlendioxyds verbraucht.

Auch die Energie der Kohle, die heute Grundlage für die meisten Industriezweige ist, stammt letztlich aus der Photosyntheseleistung der Pflanzen (Karbon, Tertiär).

Die Photosynthese ist die großartigste Aufbauleistung auf der Erde. Sie bildet heute die Grundlage für das gesamte Leben.

Chemosynthese

Die Kohlenstoffassimilation kann nur erfolgen, wenn ein Wasserstoffspender und eine Energiequelle vorhanden sind, mit deren Hilfe CO_2 reduziert wird.

Bei der Photosynthese stammt die Energie vom Sonnenlicht; als Wasserstoffspender dient das Wasser oder der Schwefelwasserstoff (Purpurbakterien). Für die Wasserstoffgewinnung mit Hilfe des Lichtes ist die Anwesenheit von Chlorophyll notwendig.

Verschiedene Bakteriengruppen nutzen für ihren Kohlenhydrataufbau die Energie, die bei der chemischen Oxydation von Stoffen aus ihrer Umgebung frei wird. Der Wasserstoff wird aus verschiedenen Quellen bezogen: Meist wird ebenfalls Wasser gespalten, daneben dienen als Wasserstoffspender Schwefelwasserstoff (H_2S), Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3) und in selteneren Fällen organische Säuren oder mittlere Kohlenwasserstoffe (Paraffin oder Erdöl). Da die Energie nicht aus dem Licht stammt, sondern aus chemischen Prozessen gewonnen wird, nennt man diese Form der Kohlenstoffassimilation **Chemosynthese**.

Chemosynthetisch lebende Bakterien sind im Boden weit verbreitet.

Kohlenstoffassimilation

	Photosynthese	Chemosynthese
Wasserstoffspender	H_2O, H_2S	H_2O, H_2S, CH_4, NH_3 u. a.
Energiequelle für Wasserstoffgewinnung	Sonnenlicht	Oxydation verschiedener Stoffe

Die **nitrifizierenden Bakterien** sind vor allem an der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit beteiligt. Sie wandeln das bei der Eiweißzersetzung anfallende Ammoniak über Nitrite zu Nitraten um. Damit wird der leichtflüchtige Ammoniakstickstoff im Boden gehalten. Die Nitrate werden als Nährstoffe von den Wurzeln aufgenommen; sie sind die wichtigste Stickstoffquelle für die grünen Pflanzen.

Die nitrifizierenden Bakterien bestehen aus zwei Gruppen, deren Tätigkeit aufeinander abgestimmt ist: Die **Nitritbakterien** (z. B. Gattung *Nitrosomonas*) oxydieren Ammoniak (NH_3) zu salpetriger Säure. Die salpetrige Säure (HNO_2) wird von den **Nitratbakterien** (z. B. Gattung *Nitrobacter*) zu Salpetersäure (HNO_3) oxydiert. Mit der dabei gewonnenen Energie wird CO_2 reduziert und dadurch der Aufbau von Kohlenhydraten ermöglicht.

Kohlenstoffassimilation durch Chemosynthese

Nitritbakterien: $6 CO_2 + 4 NH_3 + 2 H_2O + 387 \text{ kcal} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 4 HNO_2$

Nitratbakterien: $6 CO_2 + 12 HNO_2 + 6 H_2O + 379 \text{ kcal} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 12 HNO_3$

Die notwendige Energie von 387 beziehungsweise 379 kcal wird durch Oxydationen gewonnen.

Energiegewinnung

Nitritbakterien: $2 NH_3 + 3 O_2 \rightarrow 2 HNO_2 + 2 H_2O + 2 \times 80 \text{ kcal}$

Nitratbakterien: $2 HNO_2 + O_2 \rightarrow 2 HNO_3 + 2 \times 18 \text{ kcal}$

Für die Energiegewinnung ist Sauerstoff nötig; sie kann also nur in einem gut durchlüfteten Boden stattfinden. Sorgfältige Pflege des Ackerbodens und Erhaltung seiner Krümelgare ist damit auch eine Voraussetzung für die Erhaltung und Vermehrung der Stickstoffvorräte im Boden. Wird der Boden verdichtet oder verschlämmt, so daß es an Luftsauerstoff mangelt, so tritt der entgegengesetzte Vorgang ein, die Denitrifikation. Bestimmte Bakteriengruppen (denitrifizierende Bakterien) entziehen den für ihre Lebenstätigkeit erforderlichen Sauerstoff den Nitriten und Nitraten. Die Nitrate werden über Nitrite zu reinem Stickstoff reduziert, der gasförmig in die Luft übergeht; er ist für die Pflanzen also nicht mehr verfügbar. Auf diese Weise kann bei mangelhafter Bodenpflege oder Vernässung innerhalb von zwei bis drei Wochen der gesamte Vorrat an verfügbarem Nährstickstoff aus einem Acker- oder Gartenboden verlorengehen.

Verwendung der Assimilate

Bei der Kohlenstoffassimilation durch Photosynthese oder Chemosynthese entstehen als erste organische Produkte meist Monosaccharide, vor allem Glucose. Diese Zucker sind Grundlage des gesamten weiteren Stoffwechselgeschehens in der Zelle. Sie sind

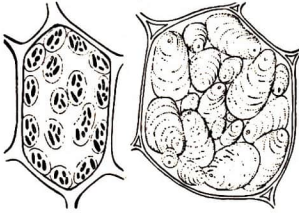


Abb. 15 Stärke. Links: Assimilationsstärke in Chlorophyllkörnern einer Moosblattzelle (500fach vergrößert); rechts: Speicherstärke in der Zelle einer Kartoffelknolle (200fach vergrößert)

geschieden; er wird in unlösliche Stärke umgewandelt. Diese Assimilationsstärke lagert sich in Form kleinster Körnchen in den Chloroplasten ab (Abb. 15). Nachts wird sie wieder zu Zucker abgebaut, in dieser löslichen Form abtransportiert und an die Verbrauchsorte, die chlorophyllfreien Zellen und die Speicherorgane der Pflanze, geleitet. Dort werden die Kohlenhydrate als Speicherstärke abgelagert.

Stärke und stärkeähnliche Produkte stellen für die Pflanze in der Regel eine Zuckerreserve dar, die nach Bedarf wieder in den Stoffwechsel einbezogen wird. Trauben- und Fruchtzucker ergeben zusammen den Rohr- oder Rübenzucker (Saccharose), der von manchen Pflanzen als Reservestoff gespeichert wird (Zuckerrohr, Zuckerrübe).

Aus Traubenzuckermolekülen werden auch die dauerhaften Zellulosewände der Pflanzenzellen aufgebaut (s. S. 18). Komplizierter ist die Produktion der übrigen organischen Stoffe, zu deren Herstellung die Zuckermoleküle wieder teilweise zerlegt und chemisch umgebaut werden. Außerdem sind hierzu noch andere chemische Grundstoffe erforderlich, die aus den Mineralsalzen des Bodens gewonnen werden.

Die Mineralsalze im Aufbau des Pflanzenkörpers

Von den zehn chemischen Elementen (s. S. 6), aus denen sich der Körper der Organismen aufbaut, deckt die Pflanze in der Regel nur ihren Bedarf an Kohlenstoff und Wasserstoff aus Kohlendioxid und Wasser. Sauerstoff wird teils aus der Luft, teils aus dem Wasser gewonnen. Alle übrigen Stoffe müssen in Form von Salzen aus dem Bodenwasser aufgenommen werden. Sie gelangen über die Leitgewebe in die verschiedenen Teile der Pflanze und schließlich in jede Zelle. Dort werden sie vom Zellplasma mit den Kohlenhydraten oder deren Umwandlungsprodukten chemisch verbunden, und daraus werden alle anderen organischen Stoffe aufgebaut.

Die folgende Übersicht zeigt die Verwendung der häufigsten chemischen Elemente, die als Salze in Form von Ionen aus dem Boden entnommen werden.

nicht nur Ausgangsmaterial für den Aufbau der meisten anderen organischen Baustoffe, sondern stellen auch das oxydierbare Material dar, aus dem im Betriebsstoffwechsel die Energie für die Lebensvorgänge gewonnen wird.

Unter günstigen Bedingungen wird tagsüber in einer assimilierenden Zelle so viel Zucker gebildet, daß er nicht vollständig weiterverarbeitet oder abtransportiert werden kann. Eine zu hohe Zuckerkonzentration aber würde den osmotischen Wert in der Zelle zu stark erhöhen und das Zellplasma schädigen. Der lösliche Zucker wird vorübergehend aus dem Stoffwechsel aus-

Stickstoff ist neben Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff Hauptbestandteil der Aminosäuren und damit aller Eiweißkörper. Er ist für Lebewesen daher unentbehrlich. Es ist hervorzuheben, daß die Pflanzen mitten in einem riesigen Stickstoffmeer leben — unsere Atmosphäre enthält 80% Stickstoff —, das ihnen nicht zugänglich ist. Die Pflanzen können den so dringend benötigten Stickstoff nur in Form von Nitrat- oder Ammoniumionen aufnehmen, die sehr leicht löslich und auswaschbar sind und meist nur spärlich im Bodenwasser vorkommen. Die Pflanzen leiden daher häufig unter Stickstoffmangel, weshalb in der Landwirtschaft Stickstoffdüngung besonders vorrangig ist. Auch diese Tatsache widerlegt die unwissenschaftliche Auffassung, daß in der Natur alles „weise“ und „zweckmäßig“ eingerichtet sei.

Phosphor wird in Form von Hydrogenphosphationen (HPO_4^- , $\text{H}_2\text{PO}_4^{--}$) aus dem Boden aufgenommen. Er dient zum Aufbau der Nukleinsäuren im Zellkern und im Zellplasma. Ferner ist Phosphor für den Aufbau der Fermente und der Phosphatide (fettähnliche Plasmabestandteile) erforderlich. Phosphorsäurereste haben Bedeutung im gesamten Stoffwechsel, weil mit ihrer Hilfe chemische Energie übertragen werden kann und dadurch viele chemische Umwandlungen beschleunigt werden (z. B. Auf- und Abbau der Kohlenhydrate).

Schwefel wird von den Pflanzen in Form von Sulfationen aus dem Boden aufgenommen; er ist Bestandteil einiger Aminosäuren, also ebenfalls am Eiweißaufbau beteiligt. Außerdem ist er in zahlreichen Wirkstoffen enthalten.

Kalium und Calcium werden als Kationen aus dem Boden aufgenommen. Sie beeinflussen vor allem die Quellung des Protoplasmas in den Zellen. Kaliumionen ziehen viel Wasser an und lassen dadurch das Plasma aufquellen; damit werden die Stoffwechselfvorgänge beschleunigt. Calciumionen bewirken das Gegenteil, sie entziehen dem Plasma Wasser und verlangsamen dadurch den Stoffwechsel. Für einen geregelten Ablauf aller Stoffwechselfprozesse ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kalium- und Calciumionen im Plasma notwendig.

Magnesium wird in Kationenform aus dem Bodenwasser aufgenommen; es wirkt in größeren Konzentrationen giftig, darf deshalb nur in geringer Menge im Boden vorhanden sein. Magnesium bildet einen wichtigen Bestandteil der Zellen, es ist beispielsweise wesentlicher Baustein des Chlorophyllmoleküls.

Eisen wird von den Pflanzen als Kation aus dem Boden aufgenommen; es ist in lebenswichtigen Wirkstoffen enthalten, zum Beispiel in Fermenten, die für den Betriebsstoffwechsel bedeutend sind. Auch zum Aufbau von Chlorophyll ist Eisen notwendig.

Neben diesen Hauptelementen spielen noch die Spurenelemente eine wesentliche Rolle. Ihr Fehlen im Boden führt stets zu krankhaft schwachem Wuchs oder sonstigen Verkümmerserscheinungen. Man kennt zum Beispiel Mangelkrankheiten, die durch das Fehlen von Kupfer, Bor und Mangan verursacht werden.

Da die Pflanzen diese Stoffe dem Boden entnehmen, wird alljährlich mit der Ernte ein großer Teil der Bodennährstoffe von den Feldern abtransportiert. Sie müssen in Form von Dünger wieder in den Boden zurückgebracht werden, weil er sonst seine Fruchtbarkeit verliert.

Fermente

Photosynthese und Chemosynthese, wie auch alle übrigen Lebensvorgänge, sind nicht einfache chemische Umsetzungen zwischen zwei Stoffen, sie stellen immer eine Kette von eng verflochtenen Prozessen dar. Die einzelnen Teilvorgänge könnten auch außerhalb eines lebenden Körpers stattfinden, sie würden dann aber regellos und meist sehr langsam ablaufen. Zum Wesen eines lebenden Organismus gehört es, daß alle Stoffwechselfvorgänge äußerst rasch und streng geordnet aufeinanderfolgen, ineinander-

greifen und einander ergänzen. Dieser geregelte Ablauf aller Stoffwechselprozesse ist nur mit Hilfe der Fermente (Enzyme) möglich.

Fermente wirken in der lebenden Zelle ähnlich wie die Katalysatoren bei chemischen Prozessen in der nichtlebenden Natur. Es sind Stoffe, die durch ihr Vorhandensein eine bestimmte chemische Reaktion stark beschleunigen, selbst aber bei diesem Vorgang nicht verbraucht werden. Sie werden häufig als Biokatalysatoren bezeichnet.

Die einfachsten Fermente sind reine Eiweißstoffe (Proteine), z. B. Pepsin, Trypsin. Die meisten Fermente bestehen dagegen aus zwei Bestandteilen, einem Eiweißkörper als „Träger“ und einer anderen organischen Verbindung, der „Wirkgruppe“. Jeder Teil für sich ist wirkungslos, erst wenn beide Teile vereinigt sind, kommen sie zur Wirkung. Die Wirkgruppe bestimmt dabei den Charakter der Fermentwirkung (z. B. Spaltung von Kohlenhydraten), das Trägerweiß dagegen die Stoffe oder Stoffgruppen, die von dem Ferment beeinflusst werden (Stärke, Zellulose o. ä.). Die Fermente haben daher in der Regel eine streng auf bestimmte Lebensvorgänge und bestimmte Stoffgruppen spezialisierte Wirkung. Trotzdem ergeben sich für alle Fermente gemeinsame Eigenschaften.

Fermente können in der Regel eine chemische Umsetzung nach zwei Richtungen bewirken: Ein und dasselbe Ferment kann unter bestimmten Bedingungen einen Stoff in seine Bestandteile spalten und ihn unter anderen Bedingungen aus diesen Bestandteilen aufbauen.

Fermente werden zwar in den lebenden Zellen gebildet, sind aber in ihrer Wirksamkeit nicht immer an lebende Zellen gebunden.

Zur Steuerung von aufbauenden (energieverbrauchenden) Prozessen müssen die Fermente meist innerhalb lebender Zellen wirken. Bei den abbauenden (energie liefernden) Vorgängen, bei denen Stoffe in ihre Bestandteile zerlegt werden, können die Fermente auch außerhalb der lebenden Zellen wirken. Sie werden dann entweder von den Zellen in die Umgebung ausgeschieden oder kommen nach dem Absterben der Zellen zur Wirkung. Dadurch ist es möglich, Nahrungsstoffe außerhalb der Körperzellen chemisch zu spalten und aufzulösen. Die zersetzenden Fermente wirken auch nach dem Tod der Zellen weiter und führen zur Selbstauflösung (Autolyse) toter Organismen.

Fermente sind nur in flüssiger Umgebung wirksam. Für alle Lebensvorgänge ist daher Wasser nötig (s. S. 24).

Die Pflanze stellt ihre Fermente selbständig aus anorganischen Stoffen her. Die heterotrophen Organismen sind auch hier auf Vorstufen angewiesen, die sie von der Pflanze beziehen. Solche Vorstufen sind manche Vitamine. Sie werden von Mensch und Tier mit der pflanzlichen Kost aufgenommen und zu Wirkgruppen von Fermenten umgebaut.

Heterotrophe Ernährungsweise

Heterotroph lebende Organismen bauen ihren Körper aus bereits vorgefertigten organischen Grundbausteinen (Monosacchariden, Fettsäuren, Aminosäuren usw.) auf; sie benötigen diese organischen Stoffe auch als Energiequelle. Diese Grundbausteine sind aber nur in den seltensten Fällen fertig vorhanden, so zum Beispiel im Blut oder in der Darmflüssigkeit von Mensch und Tier, wo sie von den entsprechenden Schma-

rotzern (z. B. Bandwürmern) sehr leicht aufgenommen werden können, so daß derartige Parasiten oft ein sehr stark rückgebildetes Verdauungssystem besitzen.

In den meisten Fällen besteht die Nahrung der heterotrophen Organismen aus tierischer oder pflanzlicher Kost, die sich aus hochmolekularen Zellbaustoffen zusammensetzt. Ihre Moleküle sind wasserunlöslich und in dieser Form nicht für den Aufbau des Körpers verwendbar. Sie müssen zuerst in ihre Grundbausteine zerlegt werden. Diesen Vorgang nennt man Verdauung.

Bei der Verdauung werden die meist wasserunlöslichen, hochmolekularen Bestandteile der Nahrung in ihre einfachen, wasserlöslichen, organischen Grundbausteine gespalten. Damit wird die Voraussetzung für die heterotrophe Assimilation geschaffen.

Die Zersetzung der Nahrung in ihre chemisch einfacheren Bauteile geschieht durch Fermente, die meist von besonderen Verdauungsdrüsen ausgeschieden werden und in einem Verdauungssaft enthalten sind, mit dem die Nahrungsteile durchtränkt werden.

Selten erfolgt die Verdauung außerhalb des Körpers. Viele Spinnen spritzen ihrer Beute mit dem tötenden Gift auch Verdauungsfermente ein, die deren Körper auflösen. Anschließend saugt die Spinne den gelösten Nahrungsbrei auf. Viele Stachelhäuter (Seeigel, Seesterne) stülpen ihren Magen teilweise nach außen und überschütten ihre Beute (meist Muscheln, deren Schalen gewaltsam geöffnet wurden) mit Verdauungssaft. Später saugen sie die aufgelösten Teile des erbeuteten Tieres auf.

In ähnlicher Weise verdauen auch manche insektenfangende Pflanzen (z. B. der Sonnentau) ihre Beute (Abb. 16).

In der Regel wird die Nahrung in bestimmte Hohlräume des Körpers aufgenommen und dort verdaut.

Bei den Urtieren geschieht dies innerhalb der Zellen (intrazelluläre Verdauung).

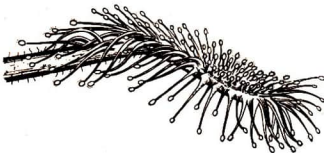


Abb. 16 Sonnentau. Oben: Blatt von der Seite gesehen mit ausgebreiteten Tentakeln; unten: Blatt von oben gesehen mit gekrümmten Tentakeln

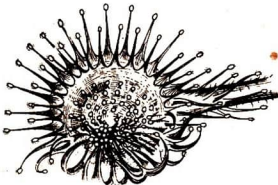


Abb. 17 Kannenpflanze (an der Seite geöffnet)
K Kanne, F von den Drüsen ausgeschiedene Flüssigkeit

Das Protoplasma schließt die Nahrungsteilchen in besondere flüssigkeitsgefüllte Hohlräume, die Nahrungsvakuolen, ein (Abb. 2), auch die Verdauungsfermente werden in diese Vakuolen abgeschieden. Wenn die Nahrung in wasserlösliche Verbindungen aufgespalten ist, werden diese in das Plasma aufgenommen, die unzersetzbaren Reste werden ausgeschieden. In ähnlicher Weise verfahren viele Schwämme und Hohltiere.

Bei den meisten höherentwickelten Tieren und vielen insektenfangenden Pflanzen erfolgt die Verdauung zwar in einer Körperhöhle, aber außerhalb der Körperzellen (extrazelluläre Verdauung).

Bei den Kannenpflanzen und ihren Verwandten sind die Blattspreiten zu einem krugförmigen Becher umgebildet, auf dessen Grund zahlreiche Verdauungsdrüsen, die von der Blattoberhaut gebildet wurden, ihre Fermente in die wäßrige Flüssigkeit absondern, die die Kanne bis zur Hälfte ausfüllt. Fällt ein Insekt hinein, so wird es zerstört, und die gelösten Stoffe werden von den Zellen der Kannenwand aufgenommen (Abb. 17).

Tiere haben für ihre Verdauung meist ein besonderes Darmsystem. Es beginnt mit einer Mundöffnung, durch die die Nahrung aufgenommen wird. Kleine Teilchen werden ganz verschluckt, größere Teile in der Regel zunächst mechanisch zerkleinert. Dazu dienen sehr verschieden gestaltete Einrichtungen, zum Beispiel die Mundwerkzeuge der Gliederfüßer, das Gebiß der Wirbeltiere, Reibzahnplatten bei Weichtieren. Nur in selteneren Fällen werden auch große Beutetiere ganz verschlungen, beispielsweise von Schlangen und manchen Vögeln. Vielfach wird die Nahrung durch zahnartige Gebilde in der Magenwand oder verschluckte Steinchen im Magen weiter zerkleinert (Vögel, Gliederfüßer).

Die Zerkleinerung ist jedoch nur die mechanische Vorarbeit für den eigentlichen Verdauungsprozeß. Durch sie wird die Gesamtoberfläche der Nahrungsteile stark vergrößert und die Voraussetzung für eine gute Wirksamkeit der Verdauungsfermente geschaffen. Die Fermente werden von den Verdauungsdrüsen erzeugt und in den Darmkanal abgeschieden, so daß die Nahrung bei ihrer Wanderung durch das Darmsystem allmählich in ihre organischen Grundbausteine zerlegt wird, die dann von den Zellen der Darmwand aufgenommen werden. Die unverdaulichen Reste werden wieder aus dem Körper hinausbefördert. Die Verdauungsdrüsen sind bei niederen Tieren über die ganze Darmwand verteilt, bei den höher entwickelten Tieren hat sich die Drüsen-tätigkeit auf bestimmte Abschnitte konzentriert (z. B. Mund, Magen, Dünndarm), so daß besondere, hochleistungsfähige Drüsenorgane entstanden (Leber, Bauchspeicheldrüse).

Die Leistungsfähigkeit der Verdauungsdrüsen wird am besten genutzt, wenn sie gleichmäßig beansprucht werden. Der chemische Verdauungsprozeß sollte daher möglichst langsam, aber ohne Unterbrechung vor sich gehen. Nur wenige Tiergruppen leben jedoch im ständigen Nahrungsüberfluß, so daß sie ihrem Darm ununterbrochen kleine Portionen zuführen können, die fortlaufend verdaut werden können. Die meisten Tiere finden nur in gewissen Zeitabständen Nahrung; sie fressen dann mehr, als ihr Darm sofort verdauen kann. Zur vorläufigen Aufbewahrung der überschüssigen Nahrung haben sich besondere Erweiterungen oder seitliche Ausbuchtungen im Darmkanal gebildet (z. B. Magen), in denen die Speisen vorübergehend abgelagert werden.

Einen besonders großen Magen haben die pflanzenfressenden Säuger, vor allem die wiederkäuenden Paarhufer, weil ihre Nahrung viel Zellulose enthält, die nur äußerst langsam abgebaut werden kann. Ein Rinderpannen beispielsweise faßt mehr als 100 Liter. Blutsaugende Parasiten, die nur selten Gelegenheit haben, einen Wirt anzufallen (Blutegel, Zecken, Wanzen u. a.) besitzen ausgedehnte seitliche Darmausbuchtungen, in denen das aufgenommene Blut gespeichert und durch Zusatz gerinnungshemmender Stoffe frisch gehalten wird, so daß solche Schmarotzer oft von einer einzigen Nahrungsaufnahme monatelang bis jahrelang zehren können.

Bei der Mannigfaltigkeit der Tiergruppen und ihrer Ernährungsweise sind naturgemäß auch ihre Darmsysteme sehr unterschiedlich ausgebildet. Trotzdem verlaufen die chemischen Verdauungsvorgänge in den Hauptzügen einheitlich. Die Nahrung enthält neben Wasser, Salzen und Vitaminen vor allem hochmolekulare Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße. Diese müssen durch hydrolytische Spaltung zu wasserlöslichen Verbindungen (Traubenzucker, Propantriol [Glycerin] und Fettsäuren sowie Aminosäuren) abgebaut werden. Der Abbau erfolgt durch besondere Fermentgruppen: Eiweißspaltende Fermente heißen Proteasen, Kohlenhydrate werden hauptsächlich von Amylasen, Saccharasen und Maltasen gespalten; Lipasen sind fettspaltende Fermente.

Die Verdauungsvorgänge bei den Säugetieren und dem Menschen

Mundhöhle. Die beim Kauen zerkleinerte Nahrung wird durch den Speichel aufgeweicht, der als wirksames Ferment die Mundspeichelamylase (Ptyalin) enthält. Sie spaltet die großen, schwerlöslichen Moleküle der Stärke (Polysaccharid) in kleinere, leichter lösliche Malzzuckermoleküle (Maltose — Disaccharid).

Da die Speise nur kurze Zeit im Mund verbleibt, kann dort nur ein Teil der Stärke in Malzzucker umgewandelt werden.

Magen. Die in der Magenwand liegenden Drüsen sondern (beim Menschen täglich etwa ein bis zwei Liter) Magensaft ab. Er enthält freie Salzsäure und das eiweißspaltende Ferment Pepsin.

Die Salzsäure bringt die Eiweißstoffe zum Quellen, so daß sie leichter vom Pepsin angegriffen werden, und hemmt das Bakterienwachstum, tötet somit einen großen Teil der mit der Nahrung verschluckten Bakterien ab. Die wichtigste Funktion der Salzsäure ist jedoch die Überführung des inaktiven Pepsins in seine wirksame Form.

Pepsin spaltet Eiweiß. Die das Pepsin erzeugenden Magendrüsen, deren Zellen ja selbst aus Eiweiß bestehen, würden sich selbst vernichten und auflösen, wenn nicht das Ferment von den Magendrüsen in einer unwirksamen Vorstufe ausgeschieden würde. Es kann erst Eiweiß zersetzen, wenn es im Magensaft mit der Salzsäure zusammentrifft, die von anderen Drüsen der Magenwand erzeugt wurde. Das durch Salzsäure wirksam gemachte Pepsin spaltet einen großen Teil der in der Nahrung enthaltenen Eiweißstoffe in lösliche Verbindungen (Polypeptide).

Die Speisen werden im Magen nicht regellos durchmischt. Sie werden so geschichtet, daß die zuerst ankommenden Teile in die Mitte des Magens kommen (Abb. 18). Dadurch kann die Salzsäure vor allem auf diejenigen Speisen einwirken, die schon länger im Magen liegen, und die Amylase des Mund-

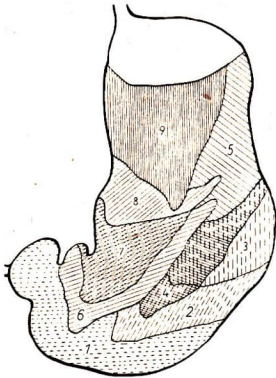


Abb. 18 Schichtung der Nahrung im Magen des Menschen

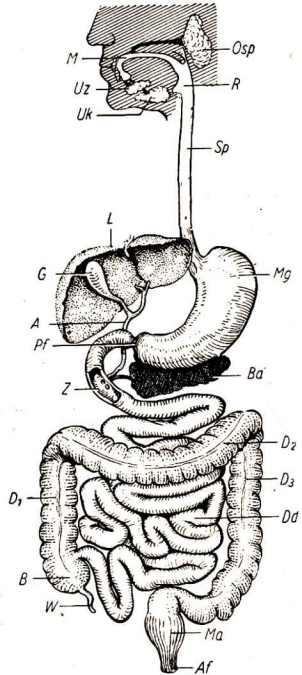
speichels, deren Wirkung von der Salzsäure zerstört wird, wirken im Magen noch etwas länger nach.

Als Ergebnis der Verdauung im Magen entsteht ein dünnflüssiger, saurer Speisebrei, der in kleinen Portionen in den Dünndarm entlassen wird.

Dünndarm. In dem aus dem Magen kommenden sauren Speisebrei sind die Fette noch gar nicht, Kohlenhydrate und Eiweißstoffe zum Teil abgebaut. Im Zwölffingerdarm (Abb. 19) münden dicht nebeneinander die Ausführungsgänge der Bauchspeicheldrüse und der Gallenblase. Ihre Sekrete mischen sich mit dem von den Drüsen der Darmwand abgesonderten Darmsaft, der im Gegensatz zum Magensaft alkalisch ist und die Wirkung des Magensaftes allmählich aufhebt.

Abb. 19 Verdauungsorgane des Menschen.

A Gallengang, Af After, B Blinddarm, Ba Bauchspeicheldrüse, D₁ aufsteigender, D₂ quer verlaufender, D₃ absteigender Teil des Dickdarms, Dd Dünndarm, G Gallenblase, L Leber, M Mundhöhle, Ma Mastdarm, Mg Magen, Osp Ohrspeicheldrüse, Pf Pfortner, R Rachenhöhle, Sp Speiseröhre, Uk Unterkieferspeicheldrüse, Uz Unterzungspeicheldrüse, W Wurmfortsatz, Z Zwölffingerdarm



Der von der Bauchspeicheldrüse abgeschiedene Bauchspeichel (beim Menschen etwa eininhalb Liter je Tag) enthält in der Hauptsache vier Fermente:

Die Bauchspeichelamylase spaltet die noch nicht angegriffene Stärke zu Malzzucker auf;
die Maltase spaltet je ein Molekül Malzzucker unter Wasseraufnahme in je zwei Moleküle Traubenzucker;

die Bauchspeichellipase zerlegt die Fette in Propantriol und Fettsäuren;

das Trypsin, ein Fermentgemisch, spaltet Eiweiß und wird, wie das Pepsin, in einer unwirksamen Vorstufe in der Bauchspeicheldrüse erzeugt. Im Darmsaft wird es durch ein von den Dünndarmzellen abgesondertes Ferment, die Enterokinase, zur Wirkung gebracht und spaltet Eiweiße (Polypeptide) in Dipeptide.

In der Leber wird Gallensaft erzeugt (beim Menschen etwa 1 l täglich). Bei den meisten Säugern wird er zunächst in der Gallenblase gespeichert, dort auf ein Zehntel seiner Menge eingedickt und später nach Bedarf durch den Gallengang in den Dünndarm entlassen. Die in der Galle enthaltenen Gallensäuren fördern die Fettverdauung. Sie zerteilen die wasserunlöslichen Fette in eine aus feinsten Tröpfchen bestehende Emulsion. In diesem äußerst feinverteilten Zustand kann das Fett von den fettspaltenden Fermenten leicht angegriffen werden, zum Teil wird es sogar direkt durch die Darmwand in die Lymphe aufgenommen.

Die von der Leber und der Bauchspeicheldrüse abgeschiedenen Verdauungssäfte wirken noch über den Bereich des Zwölffingerdarmes hinaus, ihre Wirksamkeit läßt jedoch allmählich nach, und es kommen die Fermente der Dünndarmdrüsen zur Wirkung.

Die Dünndarmdrüsen sondern ebenfalls mehrere Fermente ab:

Das Erypsin ist eine Protease und spaltet niedermolekulare Eiweißstoffe (Tripeptide Dipeptide) in Aminosäuren;

eine Lipase unterstützt die Wirkung der Bauchspeichellipase und spaltet Fette in Propantriol und Fettsäuren auf;

eine Maltase baut Malzzucker zu Traubenzucker ab.

Sobald die Nahrungsstoffe im Dünndarm zu Traubenzucker, Fettsäuren und Propantriol sowie Aminosäuren aufgespalten sind, werden sie von den Zellen der Darmwand aufgesaugt, mit ihnen auch das meiste Wasser.

Dickdarm. Der in den Dickdarm gelangende Speisebrei enthält fast keine unmittelbar verdaulichen Stoffe mehr.

Der Dickdarm enthält große Mengen Bakterien. Sie zersetzen die noch übrigen Eiweißstoffe und Teile der Kohlenhydrate. Dabei wird auch ein Teil der Zellulose aus den pflanzlichen Zellwänden in einfachere Kohlenhydrate aufgespalten. Alle Kohlenhydratreste werden zu Wasser, Kohlendioxid und Methan abgebaut. Bei der Zersetzung der Eiweißstoffe entstehen übelriechende Gase und andere Abbauprodukte. Sie gelangen teilweise durch die Darmwand in das Blut und werden in der Leber unschädlich gemacht. Der Rest der Gärungs- und Fäulnisprodukte wird mit dem Kot aus dem Körper abgegeben. Die festen Bestandteile des Kotes enthalten noch sehr viele Bakterien, abgestorbene Darmwandzellen sowie unverdauliche Speisereste. Dazu gehören auch die sogenannten Füllstoffe, vor allem Zellulose. Sie dienen nicht unmittelbar zur Ernährung, füllen aber den Verdauungskanal und regen seine Tätigkeit an.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Leistung der Fermente in der Stufenfolge der Verdauungsvorgänge:

Verdauungsvorgänge

Verdauungssaft	reagiert	enthält	ändert bzw. zerlegt	in
Mundspeichel	schwach sauer bis schwach alkalisch	Ptyalin	Stärke	Malzzucker
Magensaft	stark sauer	Pepsin, (beim Säugling Lab)	Eiweiß Milch	Polypeptide Kasein)
Galle	schwach alkalisch	Gallensäuren	Fett	Fettemulsion
Bauchspeichel	alkalisch	Amylase Maltase Trypsin Lipase	Stärke Malzzucker Eiweiß und Polypeptide Fett	Malzzucker Traubenzucker Polypeptide und Dipeptide Propantriol und Fettsäuren
Darmsaft	alkalisch	Disaccharasen, Erepsin Lipase	Disaccharide Poly- und Di- peptide Fett	Monosaccharide Aminosäuren Propantriol und Fettsäuren

Aufnahme der Nährstoffe in den Körper

Die verdauten, also in organische Grundbausteine zerlegten und damit wasserlöslichen Nährstoffe werden durch die Wand des Dünndarms aufgenommen (resorbiert). Die innere Oberfläche des Darmkanals ist durch Bildung zahlreicher Darmzotten so vergrößert, daß sie für diese Aufgabe besonders geeignet ist (Abb. 20). Die Nährstoffe diffundieren durch die Darmwand hindurch, sie werden von den Zellen der Darmzotten aufgesaugt und in die Kreislaufbahnen weitergeleitet.

Traubenzucker und Aminosäuren gelangen direkt in die Blutgefäße. Fettsäuren und Propantriol werden in den Zellen der Darmwand sofort wieder zu Fetten zusammengesetzt und gelangen in dieser Form als Emulsion in die Lymphgefäße der Darmzotten. Die durch das fein verteilte Fett milchig erscheinende Lymphe heißt Chylus und wird durch die Chylusgefäße im Gekröse über den Darmlymphgefäßstamm und den Milchbrustgang in den Blutkreislauf geleitet (Abb. 20). Die im Wasser direkt löslichen Stoffe (Salze, Vitamine usw.) werden von den Darmzotten aufgenommen und in die Blutgefäße befördert.

Die Verdauungsorgane (Abb. 19) sind in ihrer Wirkung aufeinander abgestimmt. Diese Abstimmung erfolgt durch das Nervensystem und durch Hormone.

Die Nahrung reizt je nach ihrer Beschaffenheit Geschmacks- und Geruchsinnesorgane in der Mund- und Nasenhöhle und löst verschiedene Reaktionen der Speicheldrüsen aus. Trockene Nahrung fördert die Abscheidung eines dickflüssigen Verdauungsspeichels, der die Speisen gleitfähig macht. Salzige oder saure Speisen werden durch einen wäßrigen Spülspeichel verdünnt. Milch regt die Bildung eines fadenziehenden, schleimigen Speichels an. Die Absonderung der entsprechenden Speichelform kann auch durch bedingte Reflexe bereits beim Anblick oder durch die Erinnerung an bestimmte Speisen hervorgerufen werden (Zitrone). Reflexe des Nervensystems leiten auch die Absonderung von Magensaft ein.

Die Abgabe des Speisebreis in kleinen Portionen aus dem Magen in den Dünndarm wird durch Reflexe des Nervensystems gesteuert. Der Schließmuskel des Pfortners zwischen Magen und Dünndarm bleibt so lange geschlossen, wie Reste von Säure auf die Wand des Zwölffingerdarms einwirken. Sobald der aus dem Magen stammende saure Speisebrei im Zwölffingerdarm durch den Darmsaft alkalisch geworden ist, öffnet sich auf einen Nervenreiz der Pfortner und läßt einen kleinen Schub Speisebrei aus dem Magen in den Darm ein. Damit aber werden die Nerven der Dünndarmwand erneut von Säure gereizt und veranlassen den Pfortner, sich zu schließen. Auf diese Weise gelangt immer nur ein kleiner Teil des Mageninhalts in den Darm und kann dort langsam verdaut werden.

Die aus dem Magen in den Darm gelangende Säure veranlaßt auch die Bauchspeicheldrüse zur Absonderung von Bauchspeichel. Unter der Säurewirkung wird in der Darmschleimhaut ein Hormon gebildet, das über die Blutbahn die Bauchspeicheldrüse erreicht und hier die Absonderung von Bauchspeichel anregt.

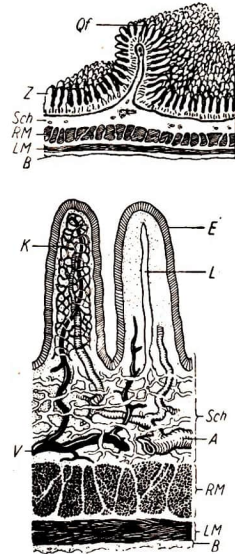


Abb. 20 Dünndarm des Menschen.

Oben: Dünndarmfalte; unten: Dünndarmzotten (links: Blutgefäße; rechts: Lymphgefäße). A Arterie, B Bauchfell, E Dünndarmepithel, K Kapillargefäße, L Lymphgefäß, LM Längsmuskulatur, Qf Querfalte, RM Ringmuskulatur, Sch Schleimhaut, V Vene, Z Zotten

Dieses Zusammenspiel ist das Ergebnis einer viele Jahrmillionen langen Entwicklung, in der eine Anpassung an die Lebensbedingungen erfolgte.

Zwischenstoffwechsel

Als Zwischenstoffwechsel bezeichnet man den Einbau der resorbierten Nährstoffe in die Zellen des Körpers und ihren Abbau unter Energiegewinnung. Der Zwischenstoffwechsel läuft also zwischen der Resorption der Nährstoffe und der Ausscheidung ihrer Abbauprodukte ab. Die Energiegewinnung beim Zwischenstoffwechsel erfolgt

durch biologische Oxydationen. Bei biologischen Oxydationen werden durch molekularen Sauerstoff Stoffe oxydiert, die unter gewöhnlichen Bedingungen von ihm nicht angegriffen werden. Hierzu sind besondere Katalysatoren, die Zellfermente, nötig. Bei der biologischen Oxydation wird zunächst dem Substrat Wasserstoff entzogen. Die Entziehung des Wasserstoffes und seine Überführung in eine aktive atomare Form erfolgen durch die wasserstoffübertragenden Fermente der Zelle. Sauerstoffübertragende Fermente vermögen den mit dem Blute zugeführten molekularen Sauerstoff in eine aktive atomare Form zu überführen. Der aktivierte Sauerstoff reagiert also niemals unmittelbar mit dem Substrat, sondern immer mit dem aktivierten Wasserstoff des Substrates und bildet mit ihm zusammen Wasser. Dieser Vorgang ist der eigentliche energieliefernde Vorgang bei der biologischen Oxydation. Von allen Formen der biologischen Oxydation hat die Atmung (s. S. 49) die größte Bedeutung.

Kohlenhydratumsatz. Der größte Teil des aufgenommenen Traubenzuckers wird in der Leber und in der Muskulatur in unlösliches Glykogen übergeführt und dort gespeichert. Im Blute verbleiben nur etwa 100 bis 110 mg in je 100 cm³ Blut. Diesen Gehalt des Blutes an Traubenzucker nennt man Blutzuckerspiegel. Der größte Teil der Kohlenhydrate wird im Zwischenstoffwechsel der Muskelzellen unter Freisetzung von Energie oxydiert. Die Endprodukte Kohlendioxyd und Wasser werden durch das Blut abtransportiert. Bei reichlicher Nahrungszufuhr an Kohlenhydraten steigt der Blutzuckerspiegel, bei Muskelarbeit sinkt er.

Hormone regeln die Konstanz des Blutzuckerspiegels. Das Insulin veranlaßt ein Absinken des Blutzuckerspiegels; es fördert den Aufbau von Glykogen aus Blutzucker in den Leberzellen. Adrenalin dagegen, das Hormon des Nebennierenmarks, fördert die Aufspaltung des Glykogens zu Traubenzucker. Es hebt also den Blutzuckerspiegel. Der Traubenzucker wird außer in den Muskeln auch in anderen Organen als Energiequelle verwertet. Im ganzen Körper sind etwa 300 g Glykogen als Betriebsstoffreserve gespeichert.

Fettumsatz. Das Fett mit seinem hohen Energiegehalt dient ebenso wie der Traubenzucker als Energiequelle. Bei seinem Abbau durch Oxydation werden große Mengen an Energie frei. Zunächst wird das Fett in Propantriol und Fettsäuren gespalten, dann werden diese zu Wasser und Kohlensäure oxydiert. Außer als Energiespender spielt das Fett eine Rolle als Speicherfett bei der Aufspeicherung der Energie, als Kälteschutz und als Polster.

Eiweißumsatz. Die im Blute kreisenden Aminosäuren liefern das Baumaterial für den Baustoffwechsel, nämlich für den Umbaustoffwechsel der Zellen und für den Aufbaustoffwechsel beim Wachstum neuer Zellen. Aminosäuren können nicht gespeichert werden. Ihr Abbau erfolgt hauptsächlich in der Leber. Dabei entstehen Ammoniak und stickstofffreie Verbindungen, die durch biologische Oxydation weiter abgebaut werden. Das Ammoniak, ein für die Zellen giftiger Stoff, verbindet sich in der Leber sofort mit Kohlendioxyd zu dem ungiftigen Harnstoff; dieser wird durch die Nieren ausgeschieden.

Wasser und Salze. Wasser und Salze werden im Verdauungsvorgang nicht verändert. Ein Teil von ihnen wird im Darm resorbiert. Unsere Körpergewebe, mit

Ausnahme von Skelett und Zähnen, enthalten durchschnittlich über 50% Wasser. Besonders viel Wasser enthalten Blut und Lymphe. Der Anteil des Wassers am Körpergewicht eines Menschen beträgt rund 60%. Beim Jugendlichen liegt der Prozentsatz noch etwas höher. Täglich werden durchschnittlich 2 bis 3 Liter Wasser im Harn, mit der Atemluft, durch die Haut und im Kot ausgeschieden, bei starken Anstrengungen und erhöhter Schweißabsonderung entsprechend mehr. Einen geringen Teil des dadurch entstehenden Wasserbedarfs deckt der Organismus durch das bei den biologischen Oxydationen entstehende Wasser. Etwa 2,5 Liter werden täglich in Getränken und Speisen aufgenommen.

Die Salze (Mineralstoffe) halten in den Körperflüssigkeiten und in den Geweben den osmotischen Druck und das Mengenverhältnis der H- und OH-Ionen zueinander konstant und regulieren die Erregbarkeit und den Quellungsgrad des Protoplasmas. Weiterhin sind sie am Aufbau lebenswichtiger Stoffe, wie des Hämoglobins und des Schilddrüsenhormons, sowie der Knochengewebe und der Bildung der Drüsensekrete beteiligt. Die physiologisch wichtigsten Salze sind Verbindungen der Elemente Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Kupfer, Eisen, Phosphor, Schwefel, Chlor, Fluor und Jod. In gemischter Kost sind die Mineralstoffe meist in ausreichender Menge enthalten. Zusätzlich muß dem Körper nur das Kochsalz in einer Menge von 5 bis 10 g täglich zugeführt werden (Gesamtbedarf 10 bis 15 g täglich).

Heterotrophe Ernährungsformen bei Pflanzen

Pflanzen können sich heterotroph ernähren, wenn die Voraussetzungen für eine autotrophe Ernährungsweise fehlen.

In der Entwicklung der Protisten und der Pflanzen kam es mehrfach zur Ausbildung von Sippen, die kein Chlorophyll besitzen. Diese Organismen nehmen den Kohlenstoff in Form organischer Verbindungen aus Wirtspflanzen oder durch Zersetzung der Reste abgestorbener Lebewesen auf (Schmarotzer, Fäulnisbewohner).

Die Mistel entzieht der Wirtspflanze Wasser und Nährstoffe; Kohlenstoff assimiliert sie mit ihren grünen Pflanzenteilen. (Halbschmarotzer, Abb. 21.)

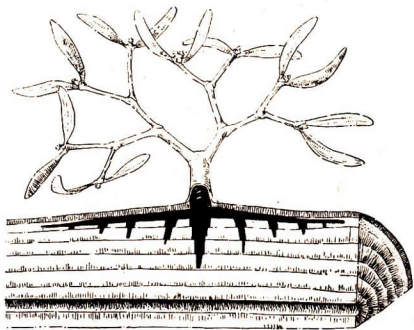


Abb. 21 Die Mistel senkt ihre Saugwurzeln (schwarz) in die Wirtspflanze

Auf Hochmooren finden wir den Sonnentau; er gehört zu den Insekten fangenden Pflanzen (Abb. 16). Der Moorboden ist arm an Stickstoff, dieser Mangel wird durch die Umsetzung tierischer Eiweiße durch die Pflanze ausgeglichen. Diese Pflanzen sind also stickstoffheterotroph.

Pilze sind heterotroph. Sie nehmen Nährstoffe auf verschiedene Weise auf. In Flechten beispielsweise leben sie mit Algen in **Symbiose**. Der Pilz entzieht der Umwelt Wasser und Salze, der Alge die organischen Verbindungen. Die Pilzwurzel (Mykorrhiza) entzieht den Wurzeln zahlreicher Holzgewächse und Kräuter organische Verbindungen; sie gibt Wasser und Nährsalze, die sie aus dem Boden aufnimmt, an die Wurzel ab (Abb. 22). Das Zusammenleben dieser unterschiedlichen Organismen ist für beide von Nutzen.



Abb. 22 Pilzfäden an der Wurzel einer Rot-Buche (*Mykorrhiza*)

Aufgabe:

Nennen Sie noch andere Beispiele für heterotrophe Ernährungsformen bei Pflanzen!

Betriebsstoffwechsel

Im Baustoffwechsel werden die Stoffe erzeugt, mit deren Hilfe jedes Lebewesen wächst und sich vermehrt, sowie die bei den Lebensvorgängen abgenutzten Teile ersetzt. Das erfordert aber ständige Neuproduktion von lebender Substanz, und keine Produktionsleistung kann ohne Energie erfolgen. Energie wird auch für die Bewegung der Organismen verbraucht. Zudem besitzt die lebende Materie, das Protoplasma mit seinen hochmolekularen Eiweißkörpern, keinen festgefühten, starren Bau, sondern ist ein äußerst kompliziertes und labiles Gebilde, dessen Teile sich in ständiger Bewegung, in dauerndem chemischem Umbau und Abbau befinden. Nur mit ständiger Zufuhr von Energie können diese abbauenden Prozesse ausgeglichen, kann das Gefüge des Protoplasmas instand gehalten werden.

Die Lebensvorgänge erfordern eine ständige hohe Zufuhr an Energie.

Der Energieverbrauch der Lebewesen wird im großen ganzen durch die unerschöpfliche Zufuhr von Sonnenenergie ausgeglichen, die von den grünen Pflanzen nutzbar gemacht wird. Diese Sonnenenergie wirkt jedoch unmittelbar nur bei einem einzigen Prozeß, der Wasserspaltung im Verlauf der Photosynthese (s. S. 29). Sie wird dabei in chemische Energie umgeformt. Die mit dieser Energie aufgebauten chemischen Verbindungen stellen die Energiequelle für alle übrigen Lebensvorgänge dar.

Zur Freisetzung dieser chemischen Energie werden höhermolekulare Stoffe, die Betriebsstoffe, chemisch in einfachere Verbindungen zerlegt. Die chemische Energie, die vorher zum Aufbau der Betriebsstoffe nötig war, wird bei deren Abbau wieder frei und steht für andere Lebensvorgänge zur Verfügung.

Als Betriebsstoffe dienen vor allem Kohlenhydrate (besonders die Zucker) und Fette.

Die Gesamtheit aller chemischen Prozesse, die zur Energieversorgung der Lebewesen dienen, nennt man Betriebsstoffwechsel oder Leistungstoffwechsel. Der chemische Abbau der Betriebsstoffe heißt Dissimilation.

Der Abbau der Betriebsstoffe im Organismus verläuft insgesamt als Oxydationsvorgang, bei dem Energie frei wird (exothermer Prozeß). Wir unterscheiden dabei Atmung und Gärung.

Atmung

Die Atmung ist die wichtigste und weitaus häufigste Form der Energiegewinnung der Lebewesen.

Bei der Atmung werden Kohlenstoffverbindungen unter Zufuhr von Sauerstoff zu Kohlendioxyd und Wasser abgebaut. Diese „biologische Oxydation“ ist dadurch gekennzeichnet, daß nur eine geringe Wärmemenge entwickelt wird. Der größte Teil der freiwerdenden Energie geht nicht als Wärme verloren, sondern wird als chemische Energie für die Lebensprozesse genutzt.

Die meisten Lebewesen nehmen den für die Atmung benötigten Sauerstoff aus ihrer Umgebung auf und geben das entstehende Kohlendioxyd ab; es erfolgt ein Gasaustausch in umgekehrter Richtung wie bei der Photosynthese der grünen Pflanzen.

Im einfachsten Fall gelangt der Sauerstoff direkt durch die Außenfläche in den Körper, auf dem gleichen Weg tritt das Kohlendioxyd aus. Da Gase nur in gelöstem Zustand im Stoffwechsel wirksam werden, ist für einen solchen einfachen Gasaustausch immer eine feuchte, sehr dünne Zell- oder Körperhaut erforderlich. Protisten, Wasserpflanzen, niedere Wassertiere und Regenwürmer nehmen den Sauerstoff mit der gesamten Oberfläche ihres Körpers auf. Bei Organismen mit luftundurchlässiger Oberfläche finden wir besondere Einrichtungen für den Gasaustausch.

Bei den Landpflanzen erfolgt der Gasaustausch durch die Spaltöffnungen.

Bei den höheren Tieren haben sich komplizierte Atmungsorgane gebildet: Tracheen, Kiemen und Lungen.

Die Atmungsorgane sind bei den zahlreichen Tiergruppen sehr unterschiedlich gebaut, stellen aber grundsätzlich nichts anderes dar als Körperteile mit einer äußerst zarten, feuchten Oberhaut, durch die der Sauerstoff aufgenommen und das Kohlendioxyd abgeschieden werden kann.

Diese Teile sind meist sehr stark gefaltet oder zerteilt, so daß eine große Oberfläche für den Durchtritt der Gase vorhanden ist. Bei vielen Wassertieren liegen die Atmungsorgane als Kiemen außen am Körper, bei Landtieren sind sie als Tracheen oder Lungen in Körperhöhlen untergebracht (Schutz vor Austrocknung!).

Die Atmungsorgane erzeugen nicht die Energie für den Körper, sie nehmen nur den Sauerstoff auf und geben das Kohlendioxyd ab, wobei dieser Gasaustausch oft durch Pumpbewegungen der angrenzenden Muskulatur gefördert wird.

Die eigentlichen energieliefernden Atmungsvorgänge, die Oxydation von Kohlenstoffverbindungen, erfolgen selbständig in jeder einzelnen lebenden Zelle des Körpers. Für die rasche Beförderung der Atmungsgase zwischen den Atmungsorganen und den Körperzellen sorgt das Kreislaufsystem.

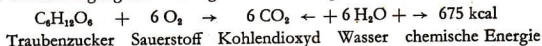
Die chemischen Vorgänge bei der Atmung in den Zellen verlaufen im wesentlichen einheitlich bei allen Organismen, von den Bakterien bis zum Menschen.

Die Biochemie der Atmung

Da die Atmung der grundlegende Lebensvorgang zur Energiegewinnung für die lebende Zelle ist, hat sie schon frühzeitig das Interesse der Wissenschaft gefunden.

Als Ausgangsmaterial (Betriebsstoff) für die Energiegewinnung dient in der Regel Traubenzucker.

Der Gesamtvorgang der Atmung läßt sich in folgender Gleichung ausdrücken:



Diese Gleichung enthält nur die Anfangs- und Endprodukte des Atmungsvorganges und sagt nichts über die Zwischenstufen aus. Sie kann dadurch zu der Annahme verleiten, die Atmung sei einfach eine Umkehrung der Photosynthese; das trifft jedoch nicht zu. Die biologische Oxydation von Traubenzucker in der lebenden Zelle besteht ebenfalls aus einer Kette zahlreicher von Atmungsfermenten gesteuerter Prozesse, von denen aber nur ein Teil in umgekehrter Richtung wie bei der Photosynthese abläuft.

Abbau des Zuckers. Der Abbau des Zuckers läßt sich in zwei Stufen gliedern:

Glykolyse: Spaltung des Traubenzuckers in Verbindungen mit drei Kohlenstoffatomen.

Säurekreislauf: Vollständiger Abbau der bei der Glykolyse entstandenen Zwischenprodukte zu Kohlendioxyd und Wasser unter Mitwirkung einer Reihe bestimmter Carbonsäuren.

Das Gesamtbild dieser für das Verständnis des Stoffwechsels äußerst bedeutenden Vorgänge zeigt in stark vereinfachter Form Abbildung 23.

Die hier grob gekennzeichneten Stufen verlaufen genau in folgender Weise:

Glykolyse. Die Glucose wird unter Beteiligung phosphatliefernder Fermente über mehrere Zwischenstufen in zwei isomere Triosemoleküle gespalten, die sich ineinander umwandeln lassen. Aus je einem Molekül Triose entsteht unter Abspaltung von Wasserstoff ein Molekül 2-Oxopropansäure (Brenztraubensäure).

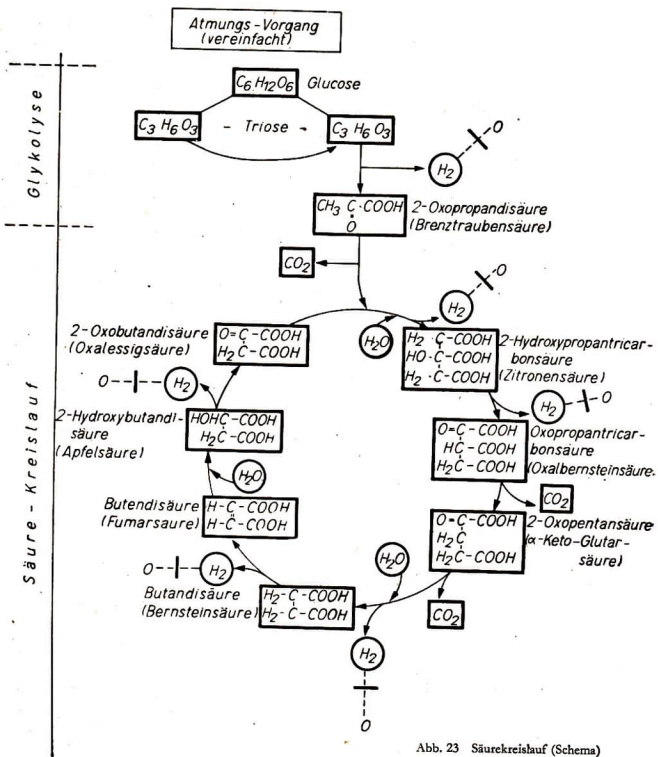


Abb. 23 Säurekreislauf (Schema)

Säurekreislauf. Der Säurekreislauf besteht aus einer Anzahl von Carbonsäuren mit vier bis sechs Kohlenstoffatomen. Diese Säuren werden in gesetzmäßiger Folge ineinander umgewandelt. Dabei wird der aus 2-Oxopropansäure (Brenztraubensäure) (3 C-Atome) nach Abspaltung von CO_2 entstandene Äthansäurerest (Essigsäurerest, mit 2 C-Atomen) mit Hilfe von Fermenten zunächst an 2-Oxobutandisäure (Oxalessigsäure, mit 4 C-Atomen) angelagert, wodurch 2-Hydroxypropantricarbonsäure (Zitronensäure, mit 6 C-Atomen) entsteht. Diese wird über verschiedene Zwischenstufen wieder zu Oxalessigsäure zurückgebildet, wobei an mehreren Stellen des Kreislaufs die Substanz des zugeführten

Essigsäurerestes Stück um Stück wieder so abgestoßen wird, daß fünfmal je zwei Atome Wasserstoff und zweimal je ein Molekül CO_2 ausscheiden. Dazu werden zusätzlich drei Moleküle Wasser vorläufig aus dem Zwischenstoffwechsel entzogen.

Die Oxydation aller Stoffe, die Zwischenstufen des Zuckerabbaues darstellen, verläuft in zwei Teilvorgängen: Zunächst wird Wasserstoff abgespalten. Mit diesem freigesetzten Wasserstoff verbindet sich dann erst der für die Gesamatmung notwendige Sauerstoff. Dabei wird der Hauptanteil der Energie gewonnen, als Endprodukt entsteht Wasser.

Biologische Oxydation des Wasserstoffs. Der Wasserstoff verbindet sich nicht unmittelbar mit dem Sauerstoff. Das gäbe eine sehr heftige und plötzliche Verbrennung mit starker Wärmeentwicklung (Knallgasreaktion), die die Zelle vernichten würde. Auch hier läuft eine Reihe komplizierter Prozesse ab, wobei die im Wasserstoff enthaltene Energie stufenweise freigesetzt und für chemische Vorgänge verfügbar wird.

Die Wasserstoffatome durchlaufen zunächst eine Reihe wasserstoffübertragender Fermente, dabei werden ihnen die Elektronen entzogen, so daß Wasserstoffionen entstehen. Die Elektronen werden über eine Reihe eisenhaltiger Fermente auf den Sauerstoff übertragen. Erst die Sauerstoffionen werden unter Mitwirkung weiterer Fermente mit den Wasserstoffionen zu Wasser verbunden (Abb. 24).

Bedeutung der Atmung

Die Atmung stellt einen grundlegenden Lebensprozeß dar und ist auf das engste mit allen Lebensregungen im Organismus verbunden. Jede gesteigerte Lebenstätigkeit ist stets mit einer erhöhten Atmung verbunden. Beginnende Keimung, Wachstum, Muskelstätigkeit, aber auch Verwundung und nachfolgende Heilung führen meist zu einer sprunghaften Erhöhung der Atmungstätigkeit der beteiligten Zellen, da jede Störung im Stoffwechselgleichgewicht durch einen erhöhten Energieaufwand ausgeglichen werden muß. Bei ruhenden Zellen dagegen, etwa während der Samenruhe, ist die Atmungstätigkeit sehr stark herabgesetzt.

Die chemischen Prozesse, die beim Atmungsvorgang ablaufen, dienen nicht allein der Energiegewinnung. Die Zwischenprodukte finden an vielen Orten anderweitige

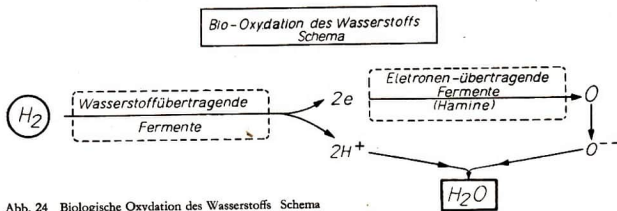


Abb. 24 Biologische Oxydation des Wasserstoffs Schema

Verwendung im Stoffwechsel, zum Beispiel im Auf- und Abbau der Fette und Eiweißstoffe (s. S.55). Besonders der Wasserstoff wird an den verschiedensten Stellen bei Reduktionsvorgängen verbraucht (z. B. Nitratreduktion, s. S.58).

Der Atmungsstoffwechsel zeigt folgende Merkmale:

1. Das Ausgangsmaterial (Glukose) wird stufenweise abgebaut.
2. Der Abbau verläuft in drei Abschnitten:
Glykolyse,
Säurekreislauf,
biologische Oxydation des Wasserstoffs.
3. Die Oxydation der Zwischenstufen geschieht in Form einer Abspaltung von Wasserstoff.
4. Bei der Oxydation dieses Wasserstoffs durch Luftsauerstoff mit Hilfe von Fermenten wird stufenweise chemische Energie freigesetzt und in anderer Form gespeichert.
5. Einige der beim Atmungsstoffwechsel auftretenden Zwischenprodukte bilden Ausgangsstoffe für den Fett- und Eiweißaufbau.

Gärung

Die Atmung ist die häufigste Form der Energiegewinnung der Lebewesen. Voraussetzung für einen reibungslosen Ablauf der Atmungsvorgänge ist das Vorhandensein ausreichender Mengen Sauerstoff. Auch alle Fermente müssen vorhanden sein und aufeinander abgestimmt wirken können.

Zahlreiche Organismen leben jedoch ohne Sauerstoff, etwa im Faulschlamm der Gewässer oder im Darm von Tier und Mensch.

Bei vielen Bakterien und Pilzen wird der komplizierte Atmungsprozeß nicht über alle Stufen bis zu Ende geführt, da diese Organismen die dazu erforderlichen Fermente nicht besitzen. Der Zucker wird in solchen Fällen nicht vollständig zu Kohlendioxyd und Wasser abgebaut, es häufen sich vielmehr verschiedene Zwischenprodukte an. Dabei wird aus einer gleichen Menge Traubenzucker wesentlich weniger Energie gewonnen als bei der normalen Atmung. Diese Vorgänge bezeichnet man als Gärung.

Gärungen sind unvollständige Atmungsvorgänge, die nur geringe chemische Energie liefern. In der Regel werden bei Gärungen von den Organismen körperfremde Stoffe abgebaut.

Gärungen haben für die menschliche Wirtschaft erhebliche Bedeutung erlangt. Das trifft vor allem für die alkoholische Gärung und die Milchsäuregärung zu.

Die alkoholische Gärung

Bestimmte Hefepilze vergären Zucker zu Alkohol und Kohlendioxyd. Bei diesem Abbau werden jedoch nur etwa 4% der Energie gewonnen, die aus derselben Zuckermenge durch Atmung gewonnen werden könnte; deshalb muß zur Gewinnung ausreichender Energiemengen in kurzer Zeit viel Zucker verarbeitet werden.

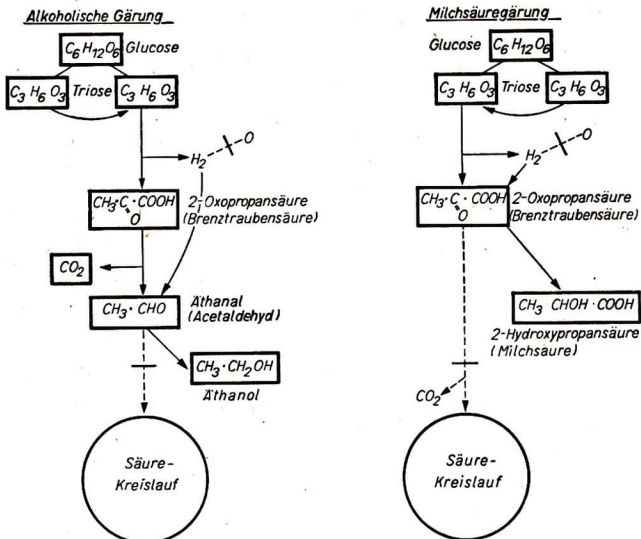


Abb. 25 Gärungsvorgänge (Schema)

Kleine Mengen von Hefe können daher große Bottiche voll Bierwürze oder Most in wenigen Tagen oder Wochen vergären. Das dabei entstehende Kohlendioxyd bringt die Gärflüssigkeit zum Brodeln.

Biochemischer Vorgang (Abb. 25). Die Glykolyse verläuft normal bis zur Bildung von 2-Oxopropansäure (Brenztraubensäure). Daraus entsteht durch Abspaltung von CO_2 Äthanal (CH_3CHO). Dies kann nicht in den Säurekreislauf eingegliedert werden, es fehlt der Sauerstoff. Der im Verlauf der Glykolyse abgespaltene Wasserstoff reduziert das Äthanal zu Äthanol.

Bei der Bierbrauerei wird der in der gekeimten Gerste, dem Malz, enthaltene Zucker, in der Weinkellerei der Zucker der Trauben vergoren.

Auch in der Bäckerei spielt die alkoholische Gärung eine Rolle. Hefepilze vergären einen Teil des Zuckers im Teig, dadurch entsteht Kohlendioxyd; zahllose Gasbläschen treiben den Teig auf. Der Alkohol verdampft in der Hitze.

Der mit Genußmitteln vom Menschen aufgenommene Alkohol kann sofort veratmet werden. Häufiger übermäßiger Alkoholgenuß führt zu dauernden organischen und psychischen Schäden, die sogar zum Tode führen können.

Essigsäuregärung

Bei ungenügendem Sauerstoffabschluß kommt es unter Sauerstoffzufuhr zu einer Oxydation des Alkohols zur Essigsäure durch Essigsäurebakterien. Diesen Vorgang hat man sich wirtschaftlich zu nutze gemacht und stellt auf diesem Weg aus Alkohol Speiseessig her.

Milchsäuregärung

Milchsäure wird von verschiedenen Bakteriensippen erzeugt; sie wirkt auf die Mikroorganismen hemmend; vor allem werden Fäulniserreger abgetötet. Man kann daher Nahrungsmittel durch Milchsäure konservieren (z. B. Sauermilch, saure Gurken, Sauerkohl, Silofutter). Die Milchsäuregärung erfolgt nur in Abwesenheit von Sauerstoff, es ist deshalb stets auf guten Luftabschluß zu achten. Andernfalls entwickeln sich sauerstoffliebende Bakterien, vor allem Fäulnisbakterien, und verderben die Nahrung durch ihre übelriechenden Ausscheidungen.

Biochemischer Vorgang (Abb. 25). Bei der Milchsäuregärung geht die Glykolyse nur bis zur Brenztraubensäure. Es fehlt das Ferment, das das Kohlendioxyd abspaltet, ebenso fehlt der Sauerstoff. Daher verbindet sich der bei der Glykolyse abgespaltene Wasserstoff wieder mit der 2-Oxopropansäure (Brenztraubensäure), und es entsteht Milchsäure (2-Hydropropansäure). Der Energiegewinn ist gering (etwa 30 kcal je Mol Glukose).

Bei der Betrachtung der Gärungsvorgänge ist zu beachten: Für den Menschen ist das Gärprodukt wichtig, für die Mikroorganismen nur der Gärvorgang, das heißt der Energiegewinn.

Bakterien oder Pilze erzeugen die verschiedenen Gärprodukte (Alkohol, Milchsäure u. a.) und gewinnen dabei Energie. Die Gärprodukte sind für die sie erzeugenden Organismen Abfall, bei bestimmter Konzentration oft sogar schädlich; die Hefepilze gehen zum Beispiel in dem von ihnen selbst produzierten Alkohol zugrunde, wenn seine Konzentration 15% übersteigt. Ähnliches gilt für die Milchsäurebakterien und Essigsäurebakterien.

Gärungsvorgänge sind auch überall dort beteiligt, wo in der Natur abgestorbene Organismen abgebaut werden (z. B. Fäulnis). Die Humusbildung im Boden sowie die Selbstreinigung der Gewässer durch Bakterien und Pilze beruhen auf verschiedenen Gärprozessen. Die Gärungsorganismen haben also große Bedeutung für den gesamten Kreislauf der Stoffe in der Natur (s. S. 60 f.).

Zusammenwirken der Stoffwechselvorgänge im Organismus

Baustoffwechsel und Betriebsstoffwechsel verlaufen nicht unabhängig voneinander; sie sind miteinander verbunden und greifen ineinander über.

Die Endprodukte des Baustoffwechsels sind oft Ausgangsmaterial für den Betriebsstoffwechsel und umgekehrt. Die zahlreichen Zwischenstufen der Photosynthese und der Atmung bilden wichtige Ansatzpunkte für alle weiteren Aufbau- und Umbauvorgänge im Körper.

Einige wichtige Beispiele sollen uns den engen Zusammenhang zwischen den aufbauenden und abbauenden Prozessen im Körper zeigen.

Zusammenhang zwischen Photosynthese und Atmung. Die Atmung könnte nicht stattfinden, wenn nicht der als Brennstoff benötigte Traubenzucker vorher durch die Photosynthese von den grünen Pflanzen aufgebaut worden wäre. Umgekehrt sind die Endprodukte der Atmung, vor allem das Kohlendioxyd, wichtig für die Photosynthese und können auch sofort bei ihrer Entstehung wieder dazu verwendet werden. Damit wird auch die Abbildung 23 ganz verständlich.

Nachts atmen die Zellen der Pflanze, es wird CO_2 abgeschieden. Bei Belichtung setzt die Photosynthese ein und verbraucht zunächst das in den Blattgeweben angehäufte Kohlendioxyd. Dadurch wird allmählich immer weniger CO_2 an die Außenluft abgegeben, bis schließlich bei einer gewissen Lichtstärke durch die Photosynthese genausoviel CO_2 verbraucht wird wie bei der Atmung neu entsteht. Äußerlich wird dann von der Pflanze weder Kohlendioxyd abgegeben noch aus der Luft aufgenommen; trotzdem herrscht in der Pflanze rege Atmungs- und Assimilationstätigkeit. Dieser Zustand wird von den Schattenpflanzen bei einer geringeren Lichtstärke erreicht als bei den Sonnenpflanzen. Mit zunehmender Lichtstärke wird die Photosynthese intensiver; der Bedarf an Kohlendioxyd übersteigt die bei der Atmung freiwerdende Menge. Nun nimmt die Pflanze CO_2 aus ihrer Umgebung auf.

Die Zwischenprodukte sind teilweise gleich. Der chemische Abbau des Traubenzuckers bei der Atmung im Rahmen der Glykolyse verläuft über die gleichen Zwischenstufen, jedoch in umgekehrter Folge wie der Aufbau von Glucose bei der Photosynthese.

Die daran beteiligten Fermente können in beiden Richtungen wirken, abbauende und aufbauende Vorgänge greifen hier direkt ineinander.

Säurebildung in fleischigen Früchten. Junge, noch grüne, fleischige Früchte atmen wegen ihres starken Wachstums intensiv. Das dabei gebildete Kohlendioxyd kann aber aus den dicken, schlecht durchlüfteten Pflanzenteilen nicht ausreichend abtransportiert werden. Es häuft sich in den Geweben an und verbindet sich mit verschiedenen Säuren des Zwischenstoffwechsels. Dadurch stauen sich organische Säuren, vor allem Äpfel- und Zitronensäure, in den jungen Früchten an, die dadurch sauer schmecken. Erst nach Beendigung des Wachstums werden im Ausreifungsprozeß die Säuren in Zucker umgewandelt.

Eiweißaufbau

Die zentrale Stellung des Atmungs-Zwischenstoffwechsels im Chemismus der Zelle wird besonders bei den Vorgängen deutlich, die zum Aufbau der Eiweiße führen. Grundbausteine der Eiweißkörper sind die Aminosäuren. Ihre Herstellung hängt eng mit dem Säurekreislauf zusammen.

Zum Aufbau der Aminosäuren ist Stickstoff nötig; die Pflanze entnimmt ihn meist in Form von Nitrationen (NO_3^-) dem Bodenwasser. In den Zellen kann Nitrat aber nicht direkt verwertet werden, es muß zu Ammoniak (NH_3) reduziert werden. Dazu ist Wasserstoff nötig, der aus dem Zwischenstoffwechsel bezogen wird. Ammoniak bildet mit Carbonsäuren des Säurekreislaufs unter Wasserstoffaufnahme Aminosäuren (Abb. 26). Tiere sind darauf angewiesen, Aminosäuren mit der Nahrung aufzunehmen.

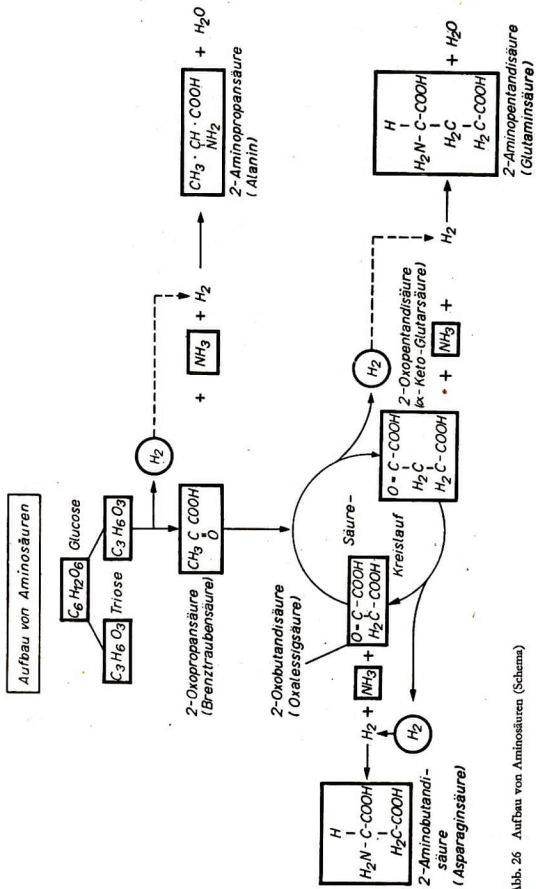


Abb. 26 Aufbau von Aminosäuren (Schema)

Fettstoffwechsel

Fette und Kohlenhydrate können einander bei der Ernährung ersetzen und werden im Körper der Lebewesen leicht ineinander umgewandelt. Kohlenhydratreiche Nahrung fördert die Fettbildung, umgekehrt liefern die Fette ein äußerst energiereiches Atmungs-material. Diese Tatsachen erklären sich leicht aus dem engen Zusammenhang zwischen dem Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel (Abb. 27).

Fette setzen sich aus Propantriol und Fettsäuren zusammen. Propantriol bildet sich unter Wasserstoffzufuhr aus Glycerinaldehyd, einer Verbindung, die bei der Glykolyse entsteht. Fettsäuren werden aus Säureresten ($\text{CH}_3 \cdot \text{CO}^-$) zusammengesetzt, die nach der Abspaltung von CO_2 aus der Brenztraubensäure entstehen. Die Essigsäurereste sind an ein Ferment gebunden, mit dessen Hilfe sie aneinandergereiht und zu den langen Kohlenstoffketten der Fettsäuren verbunden werden. Zum Aufbau von Fettsäuren wird ebenfalls reichlich Wasserstoff benötigt, dessen Energie nun in den Fetten gespeichert liegt.

Diese Vorgänge sind umkehrbar. Dadurch können die Fette leicht über ihre Bauteile in Kohlenhydrate umgeformt werden. Ebenso haben bei einer Fettspaltung das Propantriol und die Fettsäuren unmittelbar Anschluß an den Zwischenstoffwechsel der

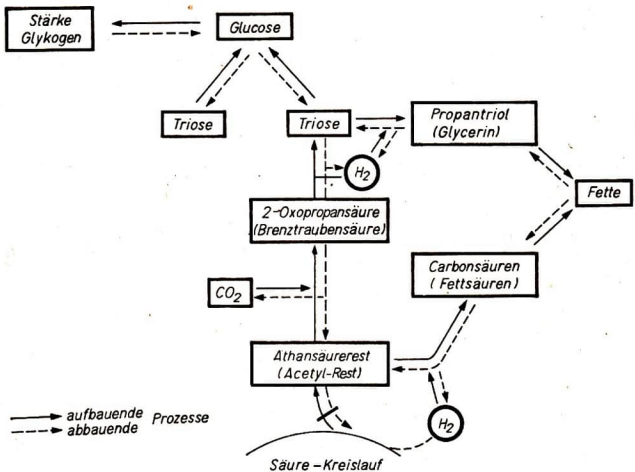


Abb. 27 Zusammenhang zwischen Kohlenhydratstoffwechsel und Fettstoffwechsel (Schema)

Atmung, können daher sofort und rasch abgebaut werden. Der hohe Anteil an Wasserstoff, der für den Aufbau der Fette benötigt wurde, erklärt die Tatsache, daß beim Fettabbau etwa doppelt soviel Energie frei wird wie beim Abbau der Kohlenhydrate.

Grund- und Nebenstoffwechsel der Pflanzen

Aus den Kohlenhydraten und Eiweißen werden unter Einbeziehung der Mineralsalze alle übrigen für die Lebensvorgänge notwendigen Verbindungen aufgebaut; beispielsweise Fermente und andere Wirkstoffe, organische Säuren, strukturbildende Verbindungen (Eiweiße, Zellulose) und Reservestoffe. Die für die Erhaltung des Lebens unbedingt nötigen Prozesse bilden zusammen den Grundstoffwechsel.

Zum Grundstoffwechsel gehören: Stoffwechsel der Kohlenhydrate, Auf- und Abbau der Eiweiße, Mineralsalzstoffwechsel, Wasserhaushalt.

Der Grundstoffwechsel verläuft bei allen Pflanzen in gleicher Form. Daneben werden jedoch noch viele Verbindungen aufgebaut, die am Grundstoffwechsel nicht beteiligt sind. Sie gehören dem **Nebenstoffwechsel** an.

Niedere Organismen (Kernlose, Protisten) gehen meist nur wenig oder gar nicht über den Grundstoffwechsel hinaus. Bei der Höherentwicklung im Pflanzenreich hat sich mit zunehmender Arbeitsteilung auch die Produktionsfähigkeit der Zellen und Gewebe erweitert. Bei den Farnpflanzen wird erstmalig Lignin (Holzstoff) als zusätzliches Erzeugnis in größerem Umfang produziert.

Zu den für den Menschen wertvollen pflanzlichen Nebenstoffen gehören zum Beispiel: ätherische Öle als Duft- und Aromaspender, Gewürze, Heilmittel (in Lavendel, Rosen, Wermut, Wacholder, Lorbeer, Zimt, Muskat, Kümmel, Dill, Fenchel, Petersilie u. a.), Harze, Kautschuk, Gerbstoffe, Alkaloide (Nikotin, Koffein, Atropin, Morphin u. a.).

Da solche Nebenstoffe des pflanzlichen Stoffwechsels im allgemeinen um so üppiger gebildet werden, je günstiger die allgemeinen Lebensbedingungen sind, liefern die Gewächse der feuchtwarmen Tropengebiete die wertvollsten Gewürze und Genußmittel.

Durch Nährstoffmangel oder schlechte Lichtversorgung hungriernde Pflanzen erzeugen wenige oder gar keine Nebenstoffe, sie beschränken sich auf den Grundstoffwechsel. Tabak in Hungerkultur bildet beispielsweise kein Nikotin.

Grund- und Nebenstoffwechsel lassen sich jedoch nicht immer trennen. Es wäre falsch, den Pflanzen einen bis ins letzte rationellen und zweckmäßigen Stoffwechsel zuschreiben zu wollen.

Viele Pflanzenstoffe entstehen als Ergebnis von Fermentveränderungen oder aus Störungen im Stoffwechselgeschehen. Einige davon erweisen sich nachträglich als nützlich, zum Beispiel viele Duft- und Farbstoffe zur Anlockung bestäubender Insekten. Manche Nebenstoffe sind zu lebenswichtigen Bestandteilen des Gesamtstoffwechsels geworden, beispielsweise das Lignin für die Holzgewächse.

Bei anderen Stoffen ist oft nur der Ablagerungsort dafür entscheidend, ob es sich um wertvolles Reservematerial handelt. Das gilt vor allem für zahlreiche Fette. Mohnöl wird im Nährgewebe des Samens gespeichert und dient dem jungen Keimling. Olivenöl dagegen wird im Fruchtfleisch der Olive gebildet, fällt mit der reifen Frucht vom Baum und verfault mit dem Fruchtfleisch.

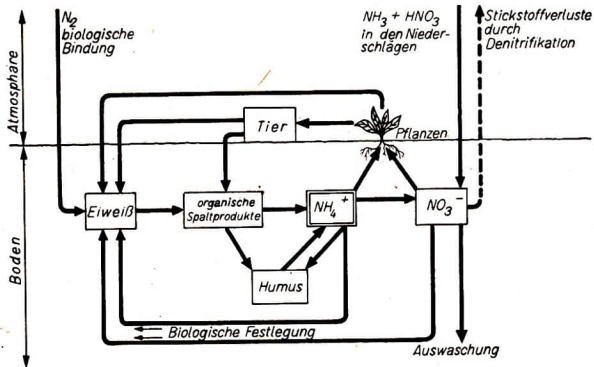


Abb. 28 Stickstoffkreislauf Schema

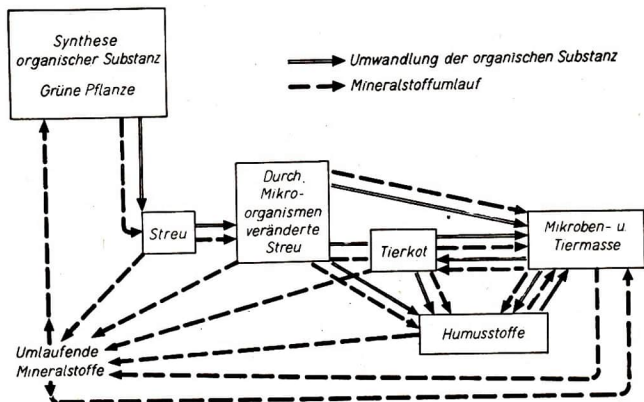


Abb. 29 Stoffkreislauf in der Natur (Schema)

Kreislauf der Stoffe in der Natur

Nicht nur in jedem einzelnen Lebewesen stehen die aufbauenden und abbauenden Prozesse in enger Verbindung miteinander; in der gesamten Natur befinden sich Produktion und Verbrauch im Gleichgewicht, gelten die Gesetze von der Erhaltung der Masse und der Energie.

Wir unterscheiden bei den Organismen drei große Gruppen: Erzeuger, Verbraucher und Zersetzer.

Erzeuger sind die autotrophen Lebewesen, vor allem die grünen Pflanzen. Sie bauen organisches Material aus anorganischen Bestandteilen auf. Zu den Verbrauchern zählt die Mehrzahl der heterotrophen Organismen, vor allem die Tiere. Zersetzer sind eine besondere Gruppe der heterotrophen Lebewesen, vor allem Bakterien und Pilze sowie Bodentiere, welche die Reste von abgestorbenen Organismen zerkleinern, chemisch umsetzen und bis zu anorganischen Bestandteilen abbauen (mineralisieren). Damit liefern sie wiederum die Nährstoffe für die grünen Pflanzen, die Erzeuger.

So findet ein ständiger Kreislauf aller Stoffe in der lebenden Natur statt (Abb. 28 und 29).

Aufgaben und Fragen:

1. Würde eine Pflanze besser in rotem oder in grünem Licht gedeihen? Erklären Sie!
2. Wie kann man durch die Anwendung radioaktiver (markierter) Isotope den Verlauf der Photosynthese verfolgen?
3. Pflanzen sehr nasser Standorte oder Moore haben oft große Lufträume in ihren Geweben. Begründen Sie diese Tatsache und geben Sie an, welche Pflanzenteile besonders reich an luftgefüllten Hohlräumen sind!
4. Nehmen Sie zu folgender Behauptung Stellung: „Tiere nehmen Sauerstoff auf und geben Kohlendioxyd ab, Pflanzen dagegen nehmen Kohlendioxyd auf und geben Sauerstoff ab.“
5. Im Sandboden erfolgt eine bessere Bewurzelung von Stecklingen als in schwerem tonigem Boden. Erklären Sie!
6. Erläutern Sie, warum zum Kuchenbacken Hefe verwendet wird!
7. Ein Frühbeet erhält zur Erwärmung des Bodens eine Packung Stallung (Pferdemist). Erklären Sie!
8. Welche Vorteile besitzt Silofutter für die Tierernährung?
9. Wie bewahrt man den Inhalt eines Futtersilos vor dem Verderben?
10. Nach dem Füllen eines Silos tritt während der ersten Tage eine merkliche Erwärmung des Inhalts ein. Später erfolgt eine allmähliche Abkühlung. Erklären Sie!

Fortpflanzung und Entwicklung

Wesen und Formen der Fortpflanzung

Die Fortpflanzung ist ein Hauptkennzeichen des Lebens. Alle Arten von Organismen erzeugen Nachkommen, die ihren Eltern in den wesentlichen Merkmalen und Eigenschaften gleichen. Die aufbauenden Stoffwechselfvorgänge im lebenden Körper gipfeln darin, daß der Organismus sich selbst immer wieder in Form der Nachkommenschaft erneuert. Da in der Regel eine Vielzahl von Nachkommen erzeugt wird, spricht man auch von Vermehrung.

Zellen, in denen noch keine Differenzierung in Zellkern und Zellplasma eingetreten ist (Kernlose), vermehren sich durch Zellsplaltung („Spaltwesen“).

Bei allen Lebewesen, deren lebender Zellinhalt in Zellkern, Zellplasma und andere Bestandteile differenziert ist, geht der Zellteilung eine komplizierte Kernteilung (Mitose, s. S.20) voraus.

Durch Zellteilung vermehren sich die einzelligen Protisten und ihre Kolonien (Abb.30).

Bei vielzelligen Organismen, deren Zellen spezialisiert sind, wird die Fortpflanzung von bestimmten Zellen oder Zellgruppen übernommen. Solche Zellen haben die Fähigkeit erhalten, einen ganzen Organismus zu bilden.

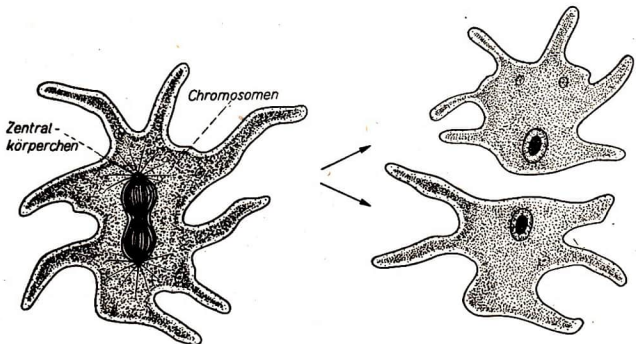


Abb. 30 Teilung eines Einzellers (Amöbe)

Geschlechtliche und ungeschlechtliche Fortpflanzung

Bei Algen, Pilzen und niederen Tieren haben vielfach die Körperzellen ihre Teilungsfähigkeit erhalten. Abgerissene Stücke eines Algenfadens oder Pilzmyzels, Teile von niederen Würmern oder Hohltieren wachsen wieder zu ganzen Organismen heran. Bei den Sproßpflanzen finden wir Bildungsgewebe mit teilungsfähigen Zellen an verschiedenen Stellen (vor allem Sproß- und Wurzelspitzen, Kambium). Pflanzenteile, die Bildungsgewebe enthalten (Brutknospen, Brutkörper, Ausläufer, Ableger, Wurzelstöcke, Stecklinge u. a.), lassen sich daher gut zur Vermehrung der Mutterpflanze verwenden.

Die ungeschlechtliche Vermehrung durch vielzellige Fortpflanzungskörper bezeichnet man als vegetative Vermehrung. Sie ist in der Natur von untergeordneter Bedeutung.

Die vielzelligen Organismen pflanzen sich in der Regel durch einzelne Zellen, die Keimzellen, fort, die meist in besonderen Fortpflanzungsorganen gebildet werden. Wir unterscheiden dabei eine ungeschlechtliche Fortpflanzung durch Sporen von einer geschlechtlichen Fortpflanzung durch Gameten (Geschlechtszellen).

Sporen sind Zellen, aus denen ohne einen Befruchtungsvorgang ein neuer Organismus entstehen kann. Die Sporen von wasserlebenden Organismen (Algen, Wasserpilze) besitzen meist Geißeln und sind dadurch beweglich. Die Sporen von Landgewächsen sind meist unbeweglich und werden in der Regel vom Wind verbreitet.

Gameten (Geschlechtszellen) verschmelzen meist paarweise miteinander. Diesen Vorgang nennt man Befruchtung. Erst nach der Befruchtung kann sich aus dem Verschmelzungsprodukt ein neuer Organismus entwickeln. In anderen Fällen entwickelt sich aus einer Keimzelle allein ein neuer Organismus.



Keimzellen. Bei vielen Algen und Pilzen zeigen die Sporen und Gameten äußerlich noch keinen Geschlechtsunterschied. Bei höheren Algen und Pilzen wird jedoch die eine Geschlechtszelle durch reiche Speicherung von Nährstoffen besonders groß und unbeweglich. Damit entstehen zwei deutlich verschiedene Formen von Gameten:



Abb. 31 Sporenbildung bei einer Fadenalge

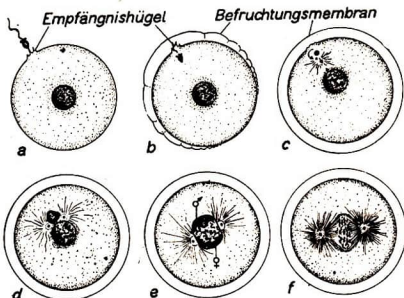


Abb. 32 Befruchtung des Seeigeelees. a ♂ Geschlechtszelle an der Eizelle, b ♂ Geschlechtszelle eingedrungen, c Befruchtungsmembran abgehoben, d ♂ Kern am Eikern, e ♂ Kern und ♀ Kern vereinigt, e der Verschmelzungskern tritt in die erste Furchungsteilung ein

Samenzellen (männlich), begeißelt, frei beweglich, sehr klein, arm an Plasma, fast nur Zellkernmasse und Eizellen (weiblich), ohne Geißeln, unbeweglich, reich an Zellplasma und Nährstoffen, wesentlich größer als die Samenzellen.

Sporen und Gameten werden im einfachsten Fall in beliebigen Zellen eines Organismus gebildet (z. B. bei vielen Fadenalgen, Abb. 31). In der Regel entstehen sie jedoch in besonderen Körperteilen, den Fortpflanzungsorganen. Die Samenzellen werden in den männlichen, die Eizellen in den weiblichen Fortpflanzungsorganen gebildet. Bei getrenntgeschlechtlichen Arten gibt es männliche und weibliche Lebewesen, die sich oft auch äußerlich deutlich voneinander unterscheiden. Zwitterige Organismen bilden weibliche und männliche Fortpflanzungsorgane in einem Körper aus.

Befruchtung. Bei der Befruchtung schwimmen die meist in sehr großer Zahl gebildeten Samenzellen zur Eizelle, eine Samenzelle dringt in die Eizelle ein, Zellplasma und Zellkerne beider Gameten verschmelzen miteinander und bilden die befruchtete Eizelle (Abb. 32).

Die Befruchtung wird von Befruchtungshormonen gesteuert. Es sind Stoffe, die von den Ei- und Samenzellen abgeschieden werden.

Von der Eizelle abgeschiedene Hormone regen die Geißeln der Samenzellen zur Bewegung an, sie ziehen die Samenzellen an, so daß diese zur Eizelle hinschwimmen. Sobald die Samenzellen die Hülle der Eizelle erreicht haben, werden sie von den Hormonen der Eihülle gelähmt und verkleben miteinander. Dadurch werden sie am weiteren Vordringen gehindert.

Die von den Samenzellen gebildeten Hormone wirken den von der Eizelle ausgeschiedenen Hormonen entgegen. Die erste Samenzelle, die die Eizelle erreicht, vermag deren Hülle an einer Stelle aufzulösen.

Sobald eine Samenzelle in die Eizelle eingedrungen ist, verdichten sich die Plasmagrenzschichten der Eizelle, so daß keine weitere Samenzelle mehr eindringen kann. Es bildet sich eine Befruchtungsmembran, innerhalb derer die lebenden Teile der Ei- und Samenzelle miteinander verschmelzen (Abb. 32).

Reduktionsteilung (Meiose). Gameten enthalten einen einfachen Chromosomensatz, sie sind haploid; die befruchtete Eizelle und die daraus entstehenden Körperzellen enthalten einen doppelten Chromosomensatz, sie sind diploid.

Bei der Befruchtung verschmelzen Ei- und Samenzelle miteinander. Die befruchtete Eizelle enthält die doppelte Anzahl von Chromosomen wie die beiden Gametenkerne, ebenso alle Körperzellen, die durch normale Zellteilung (Mitose) aus dieser befruchteten Eizelle hervorgehen. Würde diese Chromosomenzahl unverändert auf die in jeder folgenden Generation gebildeten Keimzellen übertragen, so würde nach wenigen Generationen eine riesige Anzahl von Kernschleifen in den Zellen entstehen. Das würde zu einem Mißverhältnis zwischen Plasma- und Kernmasse führen und die Zelle zum Absterben bringen. Im Prozeß der geschlechtlichen Fortpflanzung erfolgt eine Halbierung der Chromosomenzahl.

Die Halbierung der Chromosomenzahl vollzieht sich im Normalfall bei der Bildung der Keimzellen. Samen- und Eizellen entstehen in der Regel aus diploiden Mutterzellen im Innern der entsprechenden Fortpflanzungsorgane. In jeder Mutterzelle folgen zwei Teilungen (meist) kurz nacheinander. Dabei wird zwischen den beiden Teilungen der Ruhezustand des Kernes (Arbeitskern) nicht wieder hergestellt. Die einzelnen Phasen der Meiose sind folgende (Abb 33):

Zunächst spiralisieren sich die Chromosomen der diploiden Zelle. Sie werden dadurch sichtbar. Die beiden einander in Form und Größe entsprechenden Chromosomen eines Paares (homologe Chromosomen, A und a) legen sich aneinander. Danach spalten sich die Einzelchromosomen in der Längsrichtung. Die vier Spaltheilften (Chromatiden) jedes Chromosomenpaares (A, A, a, a — Tetrade) sind in der Äquatorialplatte der Zelle angeordnet. In zwei Teilungsschritten werden die vier Spaltheilften auf vier Tochterkerne verteilt. Das kann bei jedem Chromosomenpaar in anderer Weise erfolgen.



Es entstehen also in diesem Teilungsprozeß vier einander gleichwertige einfache Chromosomensätze, infolgedessen auch vier haploide Zellen aus der diploiden Mutterzelle. In vielen Fällen, zum Beispiel bei den vielzelligen Tieren, aber auch bei den höheren Pflanzen gehen beim weiblichen Geschlecht drei davon wieder zugrunde (z. B. als Polkörper der tierischen Eizellen) oder übernehmen andere Funktionen (z. B. bei den Samenpflanzen). Nur eine von ihnen wächst auf Kosten der Nährstoffe der anderen zur weiblichen Keimzelle heran.

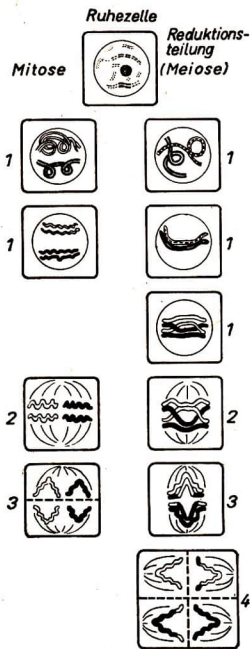


Abb. 33 Schematische Darstellung der Kernteilung.

1 Prophase, 2 Metaphase, 3 Anaphase, 4 anschließende mitotische Teilung

Bei der Befruchtung vereinigen sich die haploiden Chromosomensätze der männlichen und weiblichen Keimzellen. In der befruchteten Eizelle und den daraus durch Mitose entstehenden Körperzellen besteht jedes Chromosomenpaar daher aus einem mütterlichen und einem väterlichen Anteil. Bei einer erneuten Bildung von Keimzellen werden bei der Reduktionsteilung die einander entsprechenden mütterlichen und väterlichen Chromosomen ganz unregelmäßig verteilt. Da die Chromosomen einen großen Teil der Erbanlagen enthalten, werden so in den Keimzellen mütterliche und väterliche Anlagen ganz unterschiedlich miteinander vermischt und in der Nachkommenschaft neu kombiniert. Selbst Kinder des gleichen Elternpaares sind daher einander niemals völlig gleich.

Die Befruchtung bei Landorganismen

Die Befruchtung einer unbeweglichen Eizelle durch frei schwimmende, begeißelte Samenzellen findet bei den Algen, den wasserlebenden Pilzen, sämtlichen Moosen, Farnepflanzen und einigen Nacktsamern sowie im gesamten Tierreich bis zum Menschen in grundsätzlich gleicher Weise statt. Diese Befruchtung entspricht dem Leben im Wasser. Daß sie auch bei zahlreichen Landpflanzen und Landtieren auftritt, ist ein Zeichen dafür, daß der Ursprung alles Lebens einheitlich war und im Meer lag.

Der Übergang vom Leben im Wasser zum Leben auf dem Land führte bei Pflanzen und Tieren auch in der Fortpflanzungsweise zu Anpassungen an die neuen Lebensbedingungen.

Besamung und Befruchtung bei Landtieren

Bei den Tieren hat sich die ursprüngliche Form der Befruchtung erhalten: Die Samenzellen schwimmen zur Eizelle hin. Bei den meisten Wassertieren werden Ei- und Samenzellen frei in das sie umgebende Wasser entlassen, die Befruchtung findet dort statt. Die Jungtiere entwickeln sich in den meisten Fällen ohne Hilfe der Eltern. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Lurchen. Bei den echten Landtieren dagegen

werden die in den männlichen Fortpflanzungsorganen gebildeten Samenzellen mit Hilfe besonderer Körperteile (Begattungsorgane) in das Innere des weiblichen Körpers eingeführt (Besamung).

Im weiblichen Körper können die Samenzellen entweder sofort nach der Besamung zu den Eizellen gelangen und diese befruchten (z. B. bei den Säugetieren), oder sie bleiben in besonderen Samentaschen für längere Zeit lebensfähig erhalten. Dann kann zwischen Besamung und Befruchtung ein sehr langer Zeitraum liegen.

So erfolgt beispielsweise bei einer Bienenkönigin eine einzige Besamung durch eine Drohne. Das Bienenweibchen nimmt dabei so viele Samenzellen auf, daß davon die Eizellen (etwa eine Million) befruchtet werden können, die eine Bienenkönigin im Laufe ihres vier- bis fünfjährigen Lebens erzeugt.

Viele Zwittertiere sind in der Lage, die Samenzellen für längere Zeit aufzubewahren. In ihrem Körper bilden sich die weiblichen und männlichen Fortpflanzungsorgane meist nicht gleichzeitig. Bei den Weinbergschnecken zum Beispiel reifen zunächst die männlichen Fortpflanzungsorgane, die Tiere sind dann männlichen Geschlechts, erzeugen nur Samenzellen und tauschen diese in einem sehr komplizierten Besamungsvorgang untereinander aus. Später erst reifen die weiblichen Fortpflanzungsorgane mit den Eizellen, die dann von den in Samentaschen aufbewahrten Samenzellen befruchtet werden.

Die befruchtete Eizelle ist meist mit Nährstoffen (Dotter) und einer Schale versehen; das Ganze wird als Ei abgelegt, aus dem sich der junge Keimling entwickelt. Bei den Säugetieren, so auch beim Menschen, bleibt die befruchtete Eizelle und der sich daraus entwickelnde Embryo bis zur Geburt im mütterlichen Körper und wird von ihm direkt ernährt.

Bestäubung und Befruchtung bei Samenpflanzen

Bei den Moosen und Farnpflanzen liegen die geschlechtlichen Fortpflanzungsorgane dicht am Boden. Sie werden bei feuchtem Wetter mit Wasser benetzt, so daß die Samenzellen genügend Flüssigkeit zur Verfügung haben, um zur Eizelle gelangen zu können.

Bei den Samenpflanzen ist die Anpassung an das Leben auf dem Lande weiter entwickelt, sie sind bei ihrer Befruchtung nicht mehr auf Wasser als Übertragungsmittel angewiesen.

Den Samenpflanzen dienen Blüten als Fortpflanzungsorgane. Die Blüten der Bedecktsamer sind in der Regel zwittrig, ihre männlichen Fortpflanzungsorgane sind die Staubblätter, die weiblichen Fortpflanzungsorgane die Fruchtblätter. Die Fruchtblätter sind entweder einzeln für sich oder in ihrer Gesamtheit an den Rändern verwachsen und bilden dadurch einen Fruchtknoten, in dessen Höhlung die Samenanlagen eingeschlossen sind. Der Fruchtknoten verlängert sich meist nach oben in einen Griffel, dessen Spitze zur Narbe verbreitert ist.

Die Samenanlage besteht aus einer Hülle und einem Innenteil, der den Embryosack einschließt. Dieser entsteht aus einer Zelle (Embryosack-Mutterzelle) durch zweifache Teilung, wobei gleichzeitig der Chromosomensatz halbiert wird. Von den vier haploiden Zellen bleibt nur eine erhalten. Ihr Kern teilt sich dreimal. Von den acht Teilungskernen wandern je drei zu den beiden Polen, wo sich um jeden Kern eine Zelle bildet. Die beiden restlichen Zellkerne in der Mitte verschmelzen zum Embryosackkern. Eine der drei Zellen am oberen Pol bildet die Eizelle.

Die Narbe auf dem Stempel der meisten Blüten ist klebrig, so daß die Pollenkörner leicht an ihr haftenbleiben. Besondere Wirkstoffe, die von Drüsenzellen der Narbenoberfläche ausgeschieden werden, regen die Pollenkörner zum Keimen an. Ihre Hülle öffnet sich, und aus der größeren Zelle des Pollenkorns bildet sich ein dünner Pollenschlauch mit seinem „vegetativen“ Kern.

Der Pollenschlauch wächst im Gewebe des Griffels abwärts, bis seine Spitze in den Fruchtknoten gelangt und die Samenanlage mit dem Embryosack erreicht. Hier vollzieht sich eine doppelte Befruchtung: Im Pollenschlauch haben sich aus dem Kern der Fortpflanzungszelle des Pollenkorns zwei Fortpflanzungskerne (generative Kerne) gebildet, die an seine Spitze wandern. Der eine generative Kern dringt in die Eizelle ein und befruchtet sie. Der zweite generative Kern des Pollenschlauches wandert tiefer in den Embryosack hinein und verschmilzt mit dem Embryosackkern, der damit einen dreifachen (triploiden) Chromosomensatz erhält. Der vegetative Kern des Pollenschlauches und die übrigen Zellen des Embryosacks gehen zugrunde oder werden als Nährmaterial für den jungen Keimling aufgebraucht.

Die Bestäubung der Landpflanzen entspricht etwa der Besamung bei den Landtieren. Zwischen der Bestäubung der Pflanzen und der Befruchtung kann, ebenso wie zwischen der Besamung und Befruchtung bei Tieren, ein sehr langer Zeitraum liegen (z. B. bei der Kiefer über ein Jahr).

Generationswechsel

Viele Algen, Pilze und niedere Tiere pflanzen sich während der günstigen Jahreszeiten nur ungeschlechtlich oder eingeschlechtlich fort; sie vermehren sich dadurch sehr rasch. Die Dauerformen, die den Winter, eine Trocken- oder Hungerzeit überstehen, entstehen meist durch geschlechtliche Fortpflanzung.

Bei zahlreichen Gruppen von Lebewesen wechseln verschiedene Formen der Fortpflanzung entweder unregelmäßig oder regelmäßig miteinander ab. Einen regelmäßigen Wechsel nennt man Generationswechsel.

Generationswechsel ist im Pflanzen- und Tierreich weit verbreitet.

Generationswechsel bei den Landpflanzen

Die Entwicklung der Landpflanzen ist durch eine strenge Aufeinanderfolge von geschlechtlicher Fortpflanzung und ungeschlechtlicher Fortpflanzung gekennzeichnet. Das Bild dieses Generationswechsels ändert sich jedoch mit der Höherentwicklung der Pflanzen.

Aufgabe und Frage

1. Untersuchen Sie Sporenkapseln von Moosen sowie die Sporenkapselhäufchen an Farnwedeln mit der Lupe und dem Mikroskop!
2. Wie vollzieht sich die Fortpflanzung der Moose und Farnpflanzen?

Bei Moos- und Farnpflanzen folgen geschlechtliche und ungeschlechtliche Fortpflanzungsweise in einem regelmäßigen Generationswechsel aufeinander.

Eine ungeschlechtliche Generation (Sporophyt) erzeugt an ihren sporenbildenden Blättern (Sporophyllen) besondere Sporenbhälter (Sporangien) und darin die Sporen. Die reifen Sporenbhälter öffnen sich, die Sporen fallen heraus, sie werden vom Wind verbreitet und keimen auf günstigem Boden aus. Aus ihnen entwickelt sich ein Vorkeim mit der Geschlechtsgeneration, die in ihren Fortpflanzungsorganen die Gameten bildet. Nach der Befruchtung entsteht aus der Eizelle wieder eine ungeschlechtliche Sporengeneration.

Sporen, Geschlechtsgeneration und Gameten haben einen haploiden, die Zygote und die Sporengeneration dagegen einen diploiden Chromosomensatz.

Vergleicht man den Generationswechsel der Moose, Land- und Wasserfarne, so läßt sich eine Entwicklungsrichtung erkennen, die sich bis zu den Samenpflanzen fortsetzt: die geschlechtliche Differenzierung und eine unterschiedliche Größe der Sporen.

Bei den Moosen und Landfarnen, ebenso bei den Schachtelhalmgewächsen und den einfachen Bärlappen sehen alle Sporen äußerlich gleich aus.

Bei den (zu den Bärlappgewächsen zählenden) Moosfarnen sowie den Wasserfarnen treten dagegen geschlechtsgebundene Unterschiede auf:

Die Großsporenbhälter (Makrosporangien) entwickeln nur noch wenige (1 oder 4) Großsporen (Makrosporen), aus denen später der weibliche Vorkeim entsteht.

Die Kleinsporenbhälter (Mikrosporangien) bilden dagegen zahlreiche Kleinsporen (Mikrosporen), aus denen sich später männliche Vorkeime mit den männlichen Fortpflanzungsorganen entwickeln.

Rückbildung der Geschlechtsgeneration

Bei den Moosen stellt die Geschlechtsgeneration mit der grünen, beblätterten Moospflanze die Hauptgeneration, während die Sporengeneration nicht selbständig lebensfähig ist und als gestielte Sporenkapsel auf der Geschlechtsgeneration schmarotzt. Schon bei den Landfarnen ist die Geschlechtsgeneration — der Vorkeim — nur noch ein kleines, unscheinbares, kaum fingernagelgroßes Gebilde. Bei den Wasserfarnen und Moosfarnen sind nur noch Reste eines Vorkeims erhalten, die in der keimenden Spore eingeschlossen bleiben.

Diese Entwicklung hat ihren Endzustand bei den Samenpflanzen erreicht. Sie zeigt dort folgende Merkmale:

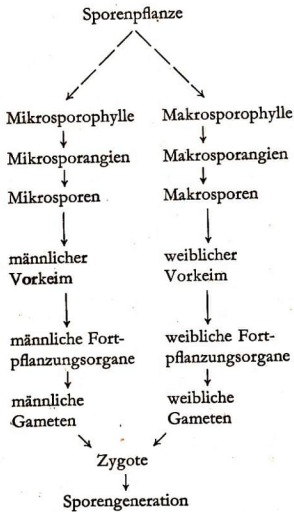
Im weiblichen Sporenbhälter wird nur eine Makrospore gebildet (Embryosackzelle).

Die Makrospore löst sich bei der Reife nicht mehr von der Mutterpflanze; sie bleibt im Sporenbhälter eingeschlossen.

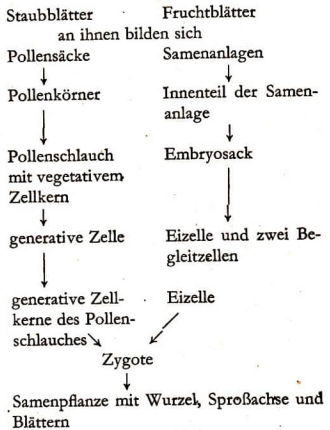
Der aus der Makrospore entstehende Vorkeim besteht nur aus wenigen Zellen. Eine davon ist die Eizelle; sie wird auf der Mutterpflanze befruchtet.

Die befruchtete Eizelle entwickelt sich auf der Mutterpflanze zu einem mehrzelligen Keimling (Embryo), der in ein Ruhestadium eintritt. Reste des Vorkeimes und Teile des ursprünglichen Sporenbhälters werden zu Nährgewebe und zur Samenschale umgebildet. Das Ganze löst sich als Samen von der Mutterpflanze und wird verbreitet.

Es ergibt sich folgende Übersicht über die Fortpflanzung der Pflanzen.



Die Samenpflanze mit Wurzel, Sprossachse und Blättern. Bestimmte Teile des Sprosses entwickeln sich zu Blüten. Sie tragen



Generationswechsel bei Tieren

Bei vielen Tiergruppen tritt ein Generationswechsel auf, so besonders bei Hohltieren, parasitischen Würmern, kleinen Krebsen und Insekten.

Man unterscheidet zwei Hauptformen des Generationswechsels:

1. Einen Wechsel von geschlechtlicher und ungeschlechtlicher Fortpflanzung.

Eine solche Form des Generationswechsels finden wir beispielsweise bei vielen Hohltieren. Die Generation mit geschlechtlicher Fortpflanzung sind die Medusen, ungeschlechtlich pflanzt sich die Polypen-Generation fort. Die Medusen erzeugen Ei- und Samenzellen, aus denen nach der Befruchtung Polypen heranwachsen. Die Polypen haben keine Geschlechtsorgane. Durch Knospung oder Teilung bilden sie Medusen.

2. Einen Wechsel von zweigeschlechtlicher Fortpflanzung und eingeschlechtlicher Fortpflanzung.

Eine solche Form des Generationswechsels finden wir bei Wasserflöhen. Es gibt männliche und weibliche Tiere, also nur Geschlechtstiere. Im Sommer finden wir nur Weibchen. Diese legen Eier, die sich unbefruchtet entwickeln. Aus den Eiern entwickeln sich immer weibliche Tiere. Dieser Vorgang wiederholt sich während des Sommers oftmals.

Im Herbst entwickeln sich die unbefruchteten Eier zu Männchen und Weibchen. Die Eier, die die Weibchen jetzt erzeugen, werden befruchtet, die Fortpflanzung erfolgt somit durch beide Geschlechter. Diese Eier überwintern, aus ihnen schlüpfen im Frühling Weibchen, die sich wiederum eingeschlechtlich fortpflanzen.

Der Entwicklungszyklus kann wesentlich unübersichtlicher werden, wenn Larvenformen und Wirtswechsel hinzukommen (z. B. häufig bei parasitischen Würmern und Insekten).

Entwicklung der befruchteten Eizelle

Aus der befruchteten Eizelle bildet sich durch vielfache Zellteilung (Mitose) zunächst der Keimling (Embryo), aus dem sich in der weiteren Folge das junge Tier oder die junge Pflanze entwickelt. In der Embryonalentwicklung treten grundlegende Unterschiede zwischen Pflanzen- und Tierreich auf.

Besonderheiten der Fortpflanzung und Entwicklung bei Pflanzen

Samenbildung. Nach der Doppelbefruchtung im Embryosack der Bedecktsamer entwickelt sich die Samenanlage weiter zum Samen.

Teil der Samenanlage	daraus entsteht als Teil des Samens
Hülle	Samenschale
Innenteil mit Embryosack	Nährgewebe
befruchtete Eizelle	Keimling (Embryo)

Der Keimling entsteht durch Zellteilungen aus der befruchteten Eizelle; er zeigt bereits die Gliederung der späteren Pflanze: Keimwurzel, Keimspieß, Keimblätter. Der Keimling liegt meist eingebettet in ein Nährgewebe, das durch vielfache Kern- und Zellteilungen aus den übrigen Teilen des Embryosacks und des Innenteils der Samenanlage hervorgeht. Die gespeicherten Nährstoffe dienen dem Keimling als erste Nahrung bei der Keimung.

Die Samenschale umgibt Embryo und Nährgewebe mit einer dauerhaften Hülle und schützt sie gegen Umwelteinflüsse.

Bei manchen Pflanzenfamilien (z. B. Rosengewächse, Schmetterlingsblütengewächse) fehlt im Samen ein gesondertes Nährgewebe; die gespeicherten Vorratsstoffe sind in den besonders dicken Keimblättern enthalten.

Der Samen ist eine junge Pflanze, die sich nach einer kurzen Anfangsentwicklung in einem vorübergehenden Ruhestand befindet.

Gleichzeitig mit der Samenbildung entwickelt sich auch der gesamte Fruchtknoten weiter und wird zur Frucht. Die Samen bleiben entweder in der Frucht eingeschlossen und werden mit ihr verbreitet (Schließfrüchte; z. B. Nüsse, Beeren, Steinfrüchte) oder sie werden nach Öffnen der Fruchtwand einzeln verbreitet (Streufrüchte; z. B. Kapseln, Hülsen, Schoten).

Aufgabe

Nennen Sie Beispiele für verschiedene Fruchtformen! Erläutern Sie die verschiedenen Möglichkeiten der Samenverbreitung!

Keimung. Vor der weiteren Entwicklung eines Samens tritt gewöhnlich eine Ruhepause von mehreren Wochen oder Monaten ein, die Samenruhe. In diesem Zustand sind die Samen äußerst widerstandsfähig gegenüber allen äußeren Einflüssen und überdauern oft ohne Schaden winterlichen Frost oder sommerliche Dürrezeiten. In ihrem Innern vollziehen sich während dieser Zeit biochemische Vorgänge, die dazu führen, daß sie allmählich die Keimfähigkeit erlangen. Sie keimen aus, sobald günstige Bedingungen hierfür eintreten (z. B. ausreichende Feuchtigkeit, günstige Temperatur, genügend Sauerstoff, unter Umständen auch ausreichendes Licht).

Wachstum. Wachstum ist eine bleibende Größenzunahme in einem lebenden Organismus. Wir unterscheiden Bildungswachstum und Streckungswachstum.

Bildungswachstum (Zellenvermehrungswachstum). In den Bildungsgeweben werden fortlaufend neue Zellen durch Teilung erzeugt (Kambium, Wachstumskegel in Sproß- und Wurzelspitze).

Streckungswachstum. Die kleinen, im Bildungsgewebe neu erstandenen Zellen strecken sich unter Aufnahme von sehr viel Wasser. Wenn die Zellen völlig gestreckt sind, ist das Wachstum des betreffenden Pflanzenteils abgeschlossen.

Das Wachstum jeder Pflanze wird sowohl von äußeren wie auch von inneren Faktoren beeinflusst. Von außen wirken vor allem Licht, Wasser, Temperatur und Bodenzusammensetzung.

Äußere Faktoren des Wachstums

Licht. Licht fördert die Bildung von Chlorophyll in den Zellen oder ist dafür unbedingt notwendig. Es beeinflusst außerdem das Streckungswachstum der Pflanzen.

Bei Lichtmangel schießen die Sprosse in die Länge, bleiben aber dünn und bleich. Die Sproßachse wächst rasch, die Blätter bleiben klein und schuppenförmig, es wird kein Chlorophyll gebildet. Diese Erscheinung bezeichnet man als Vergeilung. Hält sie an, so sterben die Pflanzen ab, da ihnen das für die Ernährung nötige Chlorophyll und Licht fehlen.

Die Vergeilung läßt sich besonders gut an Kartoffeln beobachten, die in einem dunklen Keller austreiben. Im Gartenbau benutzt man diese Erscheinung, um durch Bedecken mit Erde die jungen Triebe von Spargel und Endivie lang, schlank und zart zu erhalten.

Temperatur. Wärme beschleunigt alle chemischen Vorgänge, sie beeinflusst deshalb auch das Wachstum. Die günstigste Wachstumstemperatur (Optimum) liegt für die meisten Pflanzen zwischen 10 und 30°C, das Temperaturminimum unserer heimischen Arten liegt etwa bei 0°C, das Temperaturmaximum bei 40°C.

Wasser. Ausreichend Wasser ist für ein rasches Wachstum unerlässlich. Bei Trockenheit wachsen die Pflanzen nicht nur langsamer, sondern sie müssen sich auch stärker gegen Wasserverdunstung schützen. Stengel und Blätter werden derber, weil sie sehr viel Festigungsgewebe und dickere Abschlußgewebe bilden. Für den Aufbau solcher Schutzeinrichtungen wird viel Material und Energie verbraucht.

Bodennährstoffe. Bei Mangel an Bodensalzen wachsen die Pflanzen nur kümmerlich. Auf schlecht gedüngten Feldern steht die Frucht oft unregelmäßig. Das liegt, sofern die Feuchtigkeit gleichmäßig verteilt ist, an der unterschiedlichen Verteilung der Nährstoffe.

Innere Faktoren des Wachstums

Wuchsstoffe. Das Wachstum einer Pflanze wird von den Umweltbedingungen zwar beeinflusst und gelenkt, aber nicht verursacht. Dies geschieht durch innere Stoffwechselvorgänge, insbesondere durch bestimmte Wachstumshormone, die Wuchsstoffe.

Wuchsstoffe werden im Pflanzenkörper vor allem in den Knospen und Blättern gebildet. Von dort wandern sie von Zelle zu Zelle oder mit dem Saftstrom in den Siebröhren in die übrigen Teile der Pflanze und regen das Streckungswachstum der Zellen an.

Die Wirkung der Wuchsstoffe wurde bisher am besten an den Keimscheiden der Gräser untersucht.

Die Keimscheide ist ein stiftförmiges, hohles Gebilde, das es dem Gräserkeimling ermöglicht, den Erdboden zu durchbohren. Sie wird beim Hafer etwa 5 cm lang und umschließt schützend den Keimspieß mit dem ersten Blatt, der später durch einen Schlitz in der Keimscheidenspitze herauswächst.

Schneidet man einer Haferkeimscheide die Spitze ab, so hört ihr Streckungswachstum auf. Setzt man die Spitze wieder auf den Stumpf, so beginnt das Wachstum aufs neue.

Setzt man die abgeschnittene Spitze für etwa zwei Stunden auf kleine Agarblöckchen und klebt diese dann auf den Stumpf, so wächst dieser weiter wie mit seiner natürlichen Spitze. Heftet man das Agarblöckchen seitlich an den Stumpf, so wächst dieser nur dort und krümmt sich entsprechend nach der anderen Seite (Abb 34).

Damit ist bewiesen, daß es Stoffe gibt, die das Wachstum der Pflanze anregen. Diese Wuchsstoffe sind schon in äußerst kleinen Mengen wirksam; Millionstel eines Milligramms können das Wachstum der Sprosse und Wurzeln merklich beeinflussen. Da sie nur in so geringen Mengen im Pflanzenkörper vorkommen, hat es Jahrzehnte mühevoller Forschung bedurft, um sie rein darzustellen und chemisch untersuchen zu können.

Die Wuchsstoffe fördern das Wachstum nur in bestimmten geringen Konzentrationen, höhere Konzentrationen können dagegen hemmend wirken. Daraus ergibt sich eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft und Gartenbau. Mit Hilfe von Wuchsstoffsalben

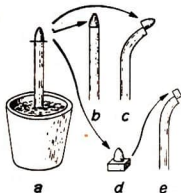


Abb. 34 Wirkung der Wuchsstoffe. a Haferkeimscheide, b abgeschnittene Spitze auf gleichen oder anderen Stumpf aufgesetzt (gerades Wachstum), c Spitze einseitig aufgesetzt (Krümmung), d Spitze auf Agarblöckchen gestellt, e Agarblöckchen einseitig aufgesetzt (Krümmung)

(Wollfett mit Wuchsstoffen) wird die Bewurzelung von Stecklingen gefördert. Daneben sind aber noch andere Wirkungen von Wuchsstoffen bekannt. Durch künstliche Zufuhr von Wuchsstoffen zu der Fruchtknotenwand ist es gelungen, samenlose Früchte von Kulturpflanzen zu erzeugen (Zitrusfrüchte, Sultaninen). Unkräuter auf Getreidefeldern werden mit starken Lösungen synthetischer Wuchsstoffe besprüht und dadurch zu einem so gesteigerten Stoffwechsel angeregt, daß sie daran zugrunde gehen.

Die Wuchsstoffe wie auch die Umweltbedingungen beeinflussen nicht nur die Geschwindigkeit, sondern auch die Richtung des Wachstums.

Besonderheiten der Fortpflanzung und Entwicklung bei Tieren

Die Entwicklung eines tierischen Organismus aus der befruchteten Eizelle kann in drei große Abschnitte unterteilt werden.

Die Furchung der befruchteten Eizelle. Unter Furchung verstehen wir eine Folge mitotischer Zellteilungen, die äußerlich durch Einschnitte (Furchen) und Vorwölbungen an der Peripherie der Eizelle sichtbar werden. Die Masse der Eizelle vermehrt sich bei diesen Prozessen nur unwesentlich, das eigentliche Zellwachstum setzt erst danach ein.

Die Art und Weise, in der die ersten Zellteilungen der befruchteten Eizelle ablaufen, ist in starkem Maße von der Dottermenge abhängig.

Die Dottersubstanzen gehören mit zu den nichtlebenden Zellbestandteilen. Sie werden von den lebenden Plasmabestandteilen auf-, ab- und umgebaut. Bei den Zellteilungen werden sie bewegt. In der Zelle stellen sie das passive, das Protoplasma dagegen das aktive Element dar.

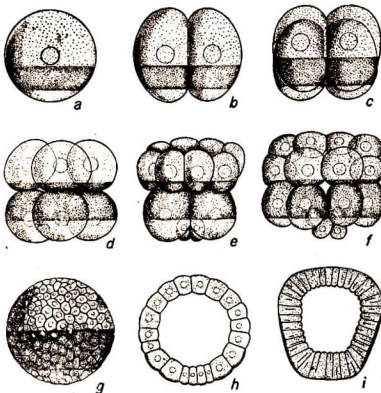


Abb. 35 Furchung eines dotterarmen Eies (Seeigel). a ungefurchtes Ei, b 2-Zellen-Stadium, c 4-Zellen-Stadium, d 8-Zellen-Stadium, e 16-Zellen-Stadium, f 32-Zellen-Stadium, g junge Blastula, h Schnitt durch junge, i durch ältere Blastula

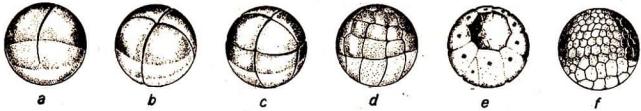


Abb. 36 Furchung eines Molchies. a 2-Zellen-Stadium, b 4-Zellen-Stadium, c 8-Zellen-Stadium, d Morula, e Schnitt durch eine Morula, f Blastula

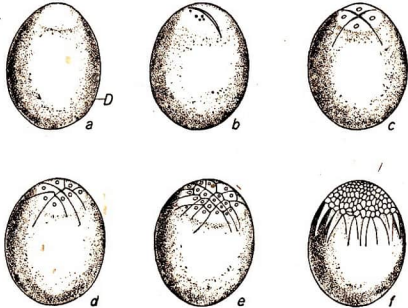
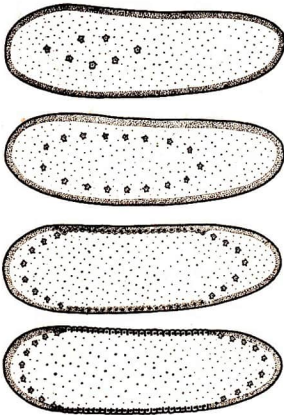


Abb. 37 Keimscheibenfurchung (Kopffüßer). a ungefurchtes Ei, b erstes, c zweites Furchungsstadium, d bis f spätere Stadien, D Dotter

Abb. 38 Furchung eines Insectencis



Eizelltypen

dotterlose beziehungsweise dotterarme Eier, deren Dottersubstanzen gleichmäßig im Zellplasma verteilt sind (z. B. Eizellen der Säugetiere und der Stachelhäuter, Abb. 35);

die Dottersubstanz ist nicht gleichmäßig verteilt, sondern vor allem an einem Pol angereichert (z. B. Eier der Amphibien, Abb. 36);

einem großen Dotterklumpen sitzt eine kleine Menge von Protoplasma — meist in Gestalt einer sogenannten Keimscheibe — auf (z. B. Eier der Vögel, Reptilien, Knochenfische; Kopffüßer, Abb. 37);

die Dottersubstanz ist im Inneren der Eizelle konzentriert. Sie wird von einem dünnen Saum aus Zellplasma umgeben. Der Zellkern liegt — in eine kleine Plasmaportion eingebettet — im Zentrum der Dottermasse (z. B. Eier der geflügelten Insekten, Abb. 38).

Es ist leicht einzusehen, daß in Eiern, die wenig oder fast keine Dottersubstanzen enthalten, die dazu noch ziemlich gleichmäßig im Zellplasma verteilt sind, die Eizelle sich ohne Schwierigkeiten teilen kann. In sehr dotterreichen Eiern aber (dazu gehört zum Beispiel das Hühnerei) ist es der verhältnismäßig kleinen Protoplasmanenge unmöglich, die um ein Vielfaches größere Dottermasse zu bewältigen. Die Furchung kann sich hier nicht wie im obenerwähnten Falle vollziehen. Nach Dottergehalt und -verteilung gibt es bei den tierischen Eizellen verschiedene Möglichkeiten der Furchung.

Die ersten Furchungsteilungen vollziehen sich mit großer Regelmäßigkeit. In gleichzeitig (synchron) verlaufenden Teilungen entstehen 2, 4, 8 und 16 Furchungszellen (Blastomeren).

Das vorläufige Ergebnis der Furchungsteilungen ist die Morula, ein Zellhaufen aus fast gleichartigen Furchungszellen.

Keimblattbildung. Die einzelnen Zellen der Morula ordnen sich zu einem Bläschen mit einer einschichtigen Wandung, zu einer Blastula um (Abb. 35).

Eine solche Hohlkugel wird — in abgewandelter Form — bei den meisten Furchungstypen gebildet.

Bei den Schwämmen ist die Embryonalentwicklung mit der Bildung der Blastula beendet. Ihre Larve entspricht vollständig der oben besprochenen Blastula. Nachdem sie sich festgesetzt hat, entwickelt sich aus ihr der junge Schwamm.

Bei den höherentwickelten Tieren geht die Entwicklung weiter. Aus der einschichtigen Blastula entsteht zunächst die zweischichtige Gastrula (Becherkeim).

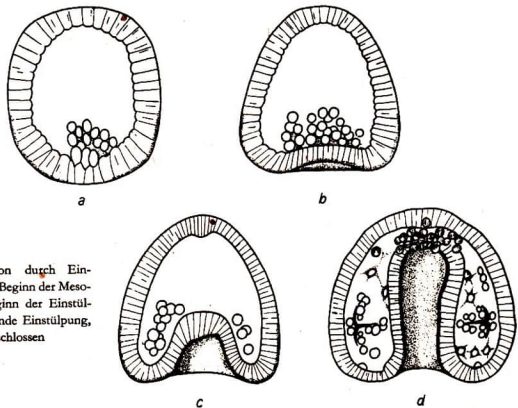


Abb. 39 Gastrulation durch Einstülpung (Seeigel). a Beginn der Mesodermbildung, b Beginn der Einstülpung, c fortschreitende Einstülpung, d Gastrulation abgeschlossen

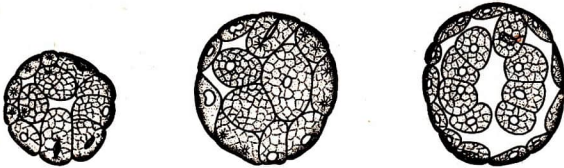
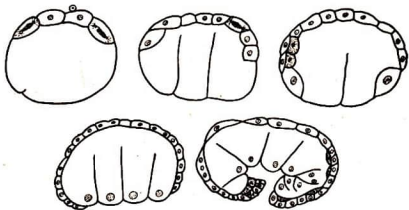


Abb. 40 Bildung des Endoderms durch multipolare Einwanderung

Bei manchen Hohltieren wandern an einem Pol Furchungszellen in den Hohlraum der Blastula hinein und ordnen sich hier zu einem zweiten Keimblatt an (polare Einwanderung). Bei anderen Hohltieren erfolgt die Einwanderung von verschiedenen Stellen der Blastulawand her (multipolare Einwanderung).

Abb. 41 Gastrulation durch Umwachsung

Die großen Zellen des einen Pols des Keimes werden von den bedeutend kleineren des anderen Keimpoles umwachsen und gelangen auf diese Weise in das Innere des Becherkeimes. Die Gastrulabildung durch Umwachsung ist bei manchen Strudelwürmern und bei Amphibien anzutreffen.



Gastrulation. In ihrer einfachsten Form vollzieht sich die Bildung der Gastrula (die Gastrulation) so, daß sich die Zellen des vegetativen Poles in die Blastulhöhle einstülpen (Abb. 39). Dort legen sie sich der äußeren Zellschicht mehr oder weniger eng an. An der so entstandenen Gastrula unterscheiden wir

eine äußere Zellschicht (äußeres Keimblatt — **Ektoderm**),
 einen Hohlraum zwischen den beiden Keimblättern (**primäre Leibeshöhle**),
 eine innere Zellschicht (inneres Keimblatt — **Entoderm**),
 den inneren Hohlraum (**Urdarm**).

Der Urdarm ist durch eine Öffnung (**Urmund**) mit der Außenwelt verbunden. Diesen Typ der Gastrulabildung bezeichnen wir als Einstülpung.

Die Gastrula kann auch auf andere Weise entstehen (Abb. 40 und 41).

Mit der ausgebildeten Gastrula hört für die Hohltiere und die primitiven Würmer die Keimblattbildung auf. Für sie beginnen jetzt die Prozesse der Formbildung.

Bei den Zellverbandstieren mit einer sekundären Leibeshöhle wird noch ein drittes Keimblatt gebildet, das zwischen Ektoderm und Entoderm liegt und mittleres Keim-

blatt oder **Mesoderm** genannt wird. Die Mesodermbildung ist noch uneinheitlicher als die Gastrulation.

Organbildung. Mit der Bildung des Mesoderms ist die Keimblattbildung abgeschlossen. Jetzt beginnt eine neue Phase der Entwicklung, in der sich aus den einzelnen Keimblättern die Organe bilden. Es entwickeln sich

aus dem Ektoderm Haut- und Nervensystem, Teile des Darmrohres,
aus dem Entoderm Darmepithel, Epithel der Darmanhangsorgane,
aus dem Mesoderm Binde- und Stützgewebe, Muskulatur, Gefäßsystem u. a.

Der größte Teil der Gewebemasse eines hochentwickelten tierischen Organismus ist mesodermalen Ursprungs.

Direkte und indirekte Entwicklung

Die ontogenetische Entwicklung ist in ihrem Ablauf bei den verschiedenen Tiergruppen sehr unterschiedlich. Prinzipiell unterscheidet man zwischen direkter und indirekter Entwicklung. Die indirekte Entwicklung ist durch das Auftreten von Larvenformen gekennzeichnet, die sich vom geschlechtsreifen Tier gestaltnäßig und im Stoffwechsel wesentlich unterscheiden. Man spricht deshalb auch von Metamorphose (Verwandlung).

Das Wesen einer Metamorphose wollen wir an Hand der Entwicklung von drei Insektenarten verdeutlichen. Wir wählen hierzu das Silberfischchen (auch Zuckergast genannt), die große Grüne Heuschrecke und den Großen Kohlweißling.

Aus den Eiern, die das Silberfischchen abgelegt hat, schlüpfen kleine Larven aus, die dem geschlechtsreifen Tier sehr ähnlich sind. Die Larven wachsen im Laufe der Zeit zum geschlechtsreifen Tier heran, wobei sie sich wegen des nur begrenzt elastischen Chitinpanzers mehrfach häuten. Die Gestalt der Larven zeigt aber keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem erwachsenen Tier. Diese Form bezeichnen wir als direkte Entwicklung.

Bei der Grünen Heuschrecke ähneln die aus den Eiern schlüpfenden Larven dem ausgewachsenen Tier nur zum Teil. Den Larven fehlen zum Beispiel noch die Flügel. Auch die Körperproportionen weichen noch stark von denen des geschlechtsreifen Tieres ab. Mit jeder Häutung wird die Larve aber dem geschlechtsreifen Insekt (Imago) ähnlicher. Seine Gestalt wird allmählich erreicht. Dies ist eine unvollständige Verwandlung, also eine Form der indirekten Entwicklung.

Eine vollständige Verwandlung, die typische Form der indirekten Entwicklung, kann man beim Kohlweißling beobachten. Hier erinnern die aus den Eiern schlüpfenden Larven, die Raupen, kaum an den Falter, der sich später aus ihnen entwickelt. Raupen nehmen viel Nahrung zu sich, wachsen schnell heran, häuten sich mehrmals, verändern aber dabei kaum ihre Gestalt. Erst die letzte Larvenhäutung schafft einen plötzlichen Formwandel. Es entsteht eine Puppe, die nahezu bewegungslos zum Beispiel an Pflanzen hängt und keinerlei Nahrung zu sich nimmt. Wenn man die Raupe als „Freßstadium“ oder „Wachstumsstadium“ bezeichnet, so ist die Puppe ein „Verwandlungsstadium“. In ihr werden die meisten Larvenorgane aufgelöst und die Organe der Imago völlig neu aufgebaut. Der Falter schlüpft dann fertig ausgebildet aus der Puppenhülle; lediglich die Flügel müssen noch gestreckt werden und erhärten.

Aufgabe

Nennen Sie andere Beispiele einer indirekten Entwicklung im Tierreich!

Die gut zu beobachtenden plötzlichen äußeren Veränderungen bei der vollständigen Metamorphose der Insekten führen immer wieder zu der Frage nach den bei der Metamorphose wirkenden Faktoren. Zahlreiche Untersuchungen der letzten 25 Jahre haben eindeutig gezeigt, daß vor allem Hormone als auslösende Faktoren wirksam sind. Die Raupenhäutungen treten ein, sobald die Hirnanhangdrüse eine bestimmte Menge „Häutungshormon“ abgegeben hat. Die Bildung der Puppe und der Imago wird von anderen Wirkstoffen gesteuert: Bestimmte Zellen des Gehirns produzieren ein Hormon, das eine Drüse im Brustabschnitt zur Bildung eines Hormons anregt. Dieses löst dann die Verpuppung und Imaginalentwicklung aus. Durch experimentelle Eingriffe in den verschiedenen Larvenstadien ist es durchaus möglich, die Puppenbildung verfrüht oder verspätet auszulösen; dadurch können Zwerg- beziehungsweise Riesenfalter entstehen.

Regulationsvorgänge bei der Ontogenese

Der komplizierte und offensichtlich gesetzmäßige Ablauf der Ontogenese ist oft als etwas Geheimnisvolles empfunden worden. Früher versuchte man ihn vielfach folgendermaßen zu erklären: Bereits in der Eizelle wird eine besondere übernatürliche Lebenskraft wirksam, und jedes auch noch so kleine Teilchen der Eizelle ist für seine spätere Funktion vorbestimmt. Diese metaphysischen Auffassungen sind durch die Forschungsergebnisse der auf diesem Gebiet arbeitenden Wissenschaftler (Entwicklungsphysiologen) widerlegt worden. Zwei der Experimente, die in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind, sollen hier erläutert werden.

Experiment 1:

Trennt man die beiden Furchungszellen eines Amphibieneies, die bei der ersten Furchungsteilung entstanden sind, voneinander, so entwickelt sich aus jeder dieser Zellen ein vollständiges Tier. Dieses ist lediglich etwas kleiner, da ja auch das Ausgangsmaterial mengenmäßig geringer war. Man kann so künstlich eineiige Zwillinge erhalten. Frühe Keimstadien sind also offensichtlich in der Lage, fehlende Teile zu ergänzen und Störungen des Entwicklungsablaufes zu regulieren. Das gilt jedoch nicht absolut.

Experiment 2:

Die Morula eines Seeigelkeimes wird in zwei Hälften zerschnitten. Die Trennungsebene verläuft dabei a) äquatorial, b) von Pol zu Pol.

Bei Versuch a führt die Entwicklung beider Hälften nur bis zu einer unvollständigen Blastula, die dann abstirbt. Das Ergebnis von Versuch b entspricht dem von Experiment 1, es entwickeln sich also zwei vollständige, aber etwas kleinere Tiere. Wie erklärt sich das unterschiedliche Ergebnis? In der Eizelle des Seeigels sind die Stoffe nicht gleichmäßig verteilt. Bestimmte Stoffe sind vorwiegend am oberen, andere vorwiegend am unteren Pol vorhanden. Entsprechend werden diese Stoffe bei der Furchung auch in verschiedenem Maße auf die Furchungszellen verteilt. Werden nun, wie beim Experiment 2 a, obere und untere Hälfte voneinander getrennt, so ist die Stoffverteilung besonders ungünstig und eine Regulation der Vorgänge nicht mehr möglich.

Das Regulationsvermögen ist bei den Keimen verschiedener Tiergruppen nicht in gleicher Weise ausgeprägt. Während bei vielen Sippen in den frühen Stadien der Ontogenese auch stärkere Keimschädigungen ausgeglichen werden können, ist das bei anderen selbst bei geringeren Schäden nicht möglich.

Die in der Keimesentwicklung besonders auffällige Erscheinung, daß Schäden ausgeglichen werden, ist auch bei erwachsenen Tieren zu beobachten. Wenn zum Beispiel einem Molch ein Bein abgebissen wird, so wächst dieses im Verlaufe weniger Monate wieder nach und ist von dem ursprünglichen Glied kaum zu unterscheiden. Hier ist das Regenerationsvermögen, wie man diese Eigenschaft nennt, besonders stark ausgeprägt. Das trifft auch für viele niedere Tiere zu. So kann man beispielsweise Schwämme in Hunderte kleiner Stücke zerschneiden, jedes einzelne wird wieder zu einem ganzen Schwamm heranwachsen. Je weiter die Differenzierung eines Organismus fortgeschritten ist, desto mehr geht das Regenerationsvermögen zurück. Bei den Säugertieren, und damit auch beim Menschen, ist das Regenerationsvermögen nur gering. In den meisten Fällen kommt es nur zu einem Wundverschluß.

Reizphysiologie der Pflanzen und Tiere

Reizbarkeit als Grundeigenschaft der lebenden Materie

Berührt man die Fiederblättchen einer Mimose, so klappen diese zusammen; werden Pantoffeltierchen, die in einem Aquarium leben, mit starkem Licht angestrahlt, so suchen sie dunklere Stellen im Gefäß auf. Wenn wir frieren, „klappern die Zähne“. Es erfolgen rhythmische Kontraktionen mancher Muskeln. Die Beispiele zeigen, daß die Lebewesen oder einzelne Organe auf Einflüsse ihrer Umwelt reagieren. Diese Eigenschaft wird als Reizbarkeit bezeichnet.

Zur Reizbarkeit gehören mehrere eng miteinander verknüpfte Vorgänge: ein Reiz, der eine Erregung auslöst, eine Erregungsleitung und eine Antwort auf den Reiz, die Reaktion.

Die Reizbarkeit ist ein Merkmal des Lebens. Wir finden sie von den Bakterien bis zum Menschen. Diese gemeinsame Eigenschaft beweist wiederum die verwandtschaftlichen Beziehungen aller Organismen. Auch lebende Teile des Körpers, etwa die verschiedenen Organe, Gewebe und einzelne Zellen sind reizbar. Isolierte Muskeln oder isolierte Nervenzellen beispielsweise werden sehr häufig benutzt, um die Reizbarkeit zu untersuchen.

Die Reizbarkeit ist eine Eigenschaft aller lebenden Systeme.

Die Reizphysiologie ist ein kompliziertes Gebiet, das der Wissenschaft lange verschlossen blieb. Inzwischen wurden auch hier chemische und physikalische Erscheinungen als Grundlage für die Reizvorgänge erkannt. Noch jetzt sind wichtige Probleme zu lösen, an keiner Stelle aber ist mehr Platz für die Annahme übernatürlicher Kräfte und für unwissenschaftliche Spekulationen, die besagen, daß die Probleme der Reizphysiologie der Erkennbarkeit verschlossen sind.

Der Reiz

Reize sind Vorgänge, die den lebenden Systemen Energie zuführen (z. B. dem Auge Lichtenergie) oder entziehen (z. B. der Haut Wärme). Dadurch verändert sich der physiologische Zustand des reizbaren Gebildes — es wird erregt.

Man unterscheidet **äußere** Reize, die aus der Umwelt auf den Organismus wirken, und **innere** Reize. Äußere Reize sind allgemein bekannt. So weiß jeder, daß er diese

Worte nur lesen kann, weil die Sinneszellen des Auges von Lichtstrahlen gereizt werden. Weit weniger augenfällig sind die inneren Reize. Beispielsweise wirkt hoher CO_2 -Gehalt im Blut auf das Atemzentrum im Nachhirn als innerer Reiz. Das Atemzentrum veranlaßt seinerseits die Atemmuskulatur zu schnelleren Bewegungen. Beide Reizgruppen können weiter unterteilt werden: Mechanische Reize, chemische Reize, osmotische Reize, thermische Reize, Strahlungsreize und elektrische Reize.

Bei Untersuchungen an Nerven und Muskeln werden meist elektrische Reize benutzt.

Reize müssen eine bestimmte Intensität besitzen und eine gewisse Zeit wirken, damit sie eine Reaktion hervorrufen. Das Produkt aus Reizintensität und Einwirkungsdauer bezeichnet man als **Reizmenge**. Die Reizmenge muß einen **Schwellenwert** überschreiten, erst dann wird sie wirksam. Ein Reiz, der gerade stark genug ist, eine Reaktion hervorzurufen, heißt **Schwellenreiz**. Reize, die schwächer sind, nennt man **unterschwellig**.

Ist ein Reiz größer als die Reizschwelle, so kann bei manchen reizbaren Gebilden (z. B. Skelettmuskeln) seine Stärke beliebig gesteigert werden, ohne daß sich die Reaktion erhöht. Wenn eine Reaktion einsetzt, erreicht sie in diesen Fällen sofort die Maximalstärke. Dies gilt jedoch nicht für alle reizbaren Systeme, zuweilen steigt nach Überschreiten der Reizschwelle die Erregungs- und Reaktionsgröße mit der Reizmenge (Lichtreize bei Pflanzenorganen; sämtliche Sinnesreize bei Tieren). Bei solchen Systemen bezeichnet man Reize, die eine maximale Wirkung auslösen, als **Maximalreize**.

Wenn mit unterschwelligen Reizen begonnen und die Reizmenge ganz allmählich gesteigert wird, findet manchmal auch nach Überschreitung der Reizschwelle keine Reizeantwortung statt. So kann das Mimosenblatt durch allmähliche Steigerung Druck- und Zugreizen ausgesetzt werden, die weit über dem Schwellenreiz liegen, ohne daß eine Reaktion erfolgt. Das gleiche findet man beim Muskel, der bei elektrischen Reizen nicht reagiert, wenn man die Stromstärke ganz langsam ansteigen läßt. In solchen Fällen spricht man vom „Einschleichen“ des Reizes.

Die Anpassung der Sinnesorgane an unterschiedliche Reizstärken nennt man **Adaptation**.

Sehr starke Reize führen allgemein zu Schädigungen, sie können schließlich den Tod herbeiführen.

Wenn die Reizintensität gering ist, die Einwirkung aber sehr lange anhält, können auch unterschwellige Einzelreize, die in kurzen Abständen aufeinanderfolgen, noch eine Reaktion auslösen. Die Einzelreize können also summiert werden (Reizsummation). Bei manchen Reflexen kann man die Reizsummation gut verfolgen, beispielsweise beim Niesen. Werden die reizbaren Nervenendigungen der Nasenschleimhaut ganz schwach gereizt, etwa durch Staubteilchen, so verspürt man lediglich ein leichtes Prickeln in der Nase. Hält der gleiche Reiz längere Zeit an, so kommt es zur Reflexentladung, dem bekannten „Hatschi“!

Folgen zwei überschwellige Reize kurz aufeinander, so werden sie gleichfalls summiert. Folgt der zweite Reiz aber sehr dicht auf den ersten, so ist er entweder ohne Wirkung, oder er führt zu einer verminderten Reaktion. Daraus folgt, daß ein reizbares System nach einem Reiz kurze Zeit unerregbar ist.

Nur selten treffen Einzelreize einen Organismus. Meist sind es Dauerreize, die eine Dauererregung auslösen. Bei einem einzigen Reiz reagiert eine Muskelfaser mit einer einzelnen Zuckung, bei Dauerreizen dagegen mit einer Dauerkontraktion.

Ein lebendes Organ oder eine Zelle reagiert nicht sofort auf den einwirkenden Reiz. Die Zeit, die verstreicht, ehe die Reaktion einsetzt, wird als Latenzzeit bezeichnet. Die Zeit, die vergeht, ehe ein ganzer Organismus auf einen Reiz antwortet, wird Reaktionszeit genannt. Bei pflanzlichen Organismen ist diese erheblich länger als bei tierischen. Bei Tieren erfolgt die Reaktion häufig so schnell, daß die Latenzzeit früher für viele Gewebe nicht meßbar war.

Eine einseitig vier Sekunden mit 30 Lux beleuchtete Keimscheide vom Hafer reagiert nach einer Stunde mit einer eben sichtbaren Krümmung. Ein elektrisch gereizter Muskel vom Frosch reagiert dagegen schon nach etwa $\frac{1}{100}$ Sekunde mit einer Zuckung. Doch wurden bei tierischen Geweben auch längere und bei pflanzlichen Geweben kürzere Latenzzeiten gemessen. Die Latenzzeit für die glatte Muskulatur des Froschmagens liegt im Bereich von einer bis mehreren Sekunden, während die Staubblätter der Berberitzenblüte eine Klappbewegung zeigen, die schon nach $\frac{1}{25}$ Sekunde einsetzen kann.

Die Reizbarkeit kann durch bestimmte künstliche Einwirkungen zeitweise herabgesetzt oder auch aufgehoben werden. Einen solchen Zustand verminderter Reizbarkeit nennt man Narkose oder Anästhesie.

Die Mittel, durch die ein solcher Zustand hervorgerufen wird, heißen Narkotika oder Anästhetika. Mit Äther oder Chloroform können beispielsweise Pflanzen und Tiere zeitweilig reizunempfindlich gemacht werden.

Die Bedeutung der Narkose für die Medizin ist außerordentlich groß. Ohne narkotische Mittel (vor allem Chemikalien und Kälte) wäre die moderne Medizin nicht denkbar, da keine größeren Operationen durchgeführt werden könnten.

Die Erregung

Reize lösen eine Erregung aus. Erregungen und ihre Leitung im Organismus können beobachtet werden, weil die erregten Gebilde elektrische Erscheinungen zeigen. Diese Erscheinungen kann man folgendermaßen nachweisen.

Man sticht in eine Nervenfasern eine dünne, stromabnehmende Elektrode und legt eine zweite gleichartige auf die Oberfläche des Nerven. Beide Elektroden werden durch ein stromanzeigendes Instrument verbunden. Das empfindliche Gerät wird eingeschaltet und zeigt einen Ausschlag, es fließt Strom. Nerveninneres und Nervenoberfläche haben also unterschiedliche elektrische Potentiale. Das Innere des Nerven zeigt eine negative Ladung, das äußere eine positive. Die Größe des Potentials beträgt etwa 40 bis 80 Millivolt. Da der Nerv bisher nicht gereizt wurde, spricht man vom Ruhepotential. Nun wird der Nerv gereizt. Der Zeiger des Gerätes geht auf die Nullmarke zurück, überschreitet diese und zeigt einen Wert von etwa -40 Millivolt an, sinkt aber sofort wieder und erreicht erneut das Ruhepotential (40 bis 80 Millivolt). Durch

die Erregung ist, wie das Gerät zeigt, der Nerv vorübergehend umgepolt worden. Das Innere der Faser wurde positiv, die Oberfläche negativ. Diese Erscheinung heißt Aktionspotential. Mit feinen Registriergeräten kann man den Aktionsstrom aufzeichnen lassen.

Mißt man die Ladung an der Oberfläche, dann ist eine erregte Stelle des Nerven gegenüber einer nichterregten Stelle immer negativ geladen. Bei einem Reiz pflanzt sich die „Negativität“ auf der Oberfläche des Nerven als Anzeichen der Erregungsleitung fort.

Aktionspotentiale sind bei der Reizung von Einzellern, Pflanzen und Tieren gefunden worden. Bei der Mimose und der Venusfliegenfalle sind die Blattbewegungen ebenso von Aktionsströmen begleitet wie die Kontraktion der Muskeln bei Tieren.

Die Erregung eines reizbaren Gebildes kann allgemein durch das Auftreten elektrischer Begleiterscheinungen festgestellt werden.

Die Erregungsleitung. Die Erregungsleitung ist meist ein kontinuierlicher Vorgang. Bei Wurzelfüßern kann sie sogar äußerlich sichtbar werden. Wenn die Scheinfüßchen einer beschalteten Amöbe (*Diffugia*) mit einer Nadel berührt werden, wird das Scheinfüßchen zunächst an dieser Stelle, danach an einer benachbarten verändert (Abb 42). So breitet sich langsam die Erregung aus. Bei schwachen Reizen wird nur ein Teil des Scheinfüßchens beeinflusst, die Erregung erlischt vorzeitig. Nimmt die Erregung während der Leitung ab, so spricht man von einer Leitung mit Dekrement (Abschwächung). Die Erregung durchläuft, je nach der Reizmenge, verschieden große Strecken. Bei höheren Tieren leiten viele Nervenfasern meist ohne Dekrement. Die Erregung wird hier ohne Abschwächung über große Strecken geleitet.

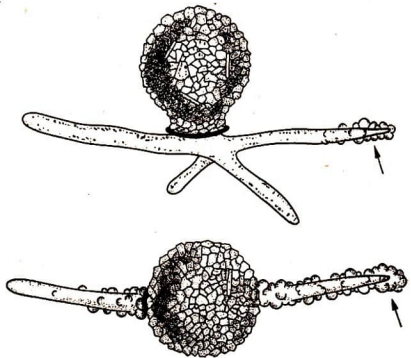


Abb. 42 Erregungsleitung bei einer beschalteten Amöbe

Man kann die Erregungsausbreitung mit einer Reihe von Explosionen aneinandergereihter Pulverhäufchen vergleichen. Wird das erste Pulverhäufchen zur Explosion gebracht, so entzündet es das folgende, dieses das nächste und so fort. Der Aktionsstrom breitet sich als Begleiterscheinung der Erregung über das reizbare Gebilde aus. Er entsteht an der erregten Stelle und wandert nach beiden Seiten des Muskels oder Nerven fort. Diese Erscheinung entspricht nicht der elektrischen Leitung in Stromkabeln, vielmehr entsteht das Aktionspotential als Folge besonderer chemisch-physikalischer Prozesse.

Auch die Tatsache, daß die Erregungsleitung höchstens Werte um 100 m/s erreicht, zeigt, daß es sich nicht um einfache elektrische Leitung handeln kann.

Die Erregungsleitung ist in Nervenfasern nach beiden Richtungen möglich. An Übergangsstellen von einer Nervenzelle zu einer anderen sowie an den Übergängen zu den Muskeln und von den Sinneszellen zu Nervenfasern, kann die Leitung jedoch nur in einer Richtung erfolgen.

Die Übertragung der Erregung von einer Nervenzelle auf eine andere, also von Neuron zu Neuron, oder von Nerven auf den Muskel an der motorischen Endplatte geschieht durch Überträgerstoffe (Acetylcholin, Novadrenalin), die vom Nerven sehr schnell freigesetzt werden.

Die Erregungsleitung bei Pflanzen hängt teilweise mit dem Transport von Wuchsstoffen zusammen (s. S. 73).

Die Geschwindigkeit der Erregungsleitung. Die Geschwindigkeit, mit der ein lebendes System eine Erregung leitet, ist sehr unterschiedlich. Allgemein zeigen die erregten Systeme tierischer Organismen eine schnellere Leitung als die erregbaren Systeme der Pflanzen.

Geschwindigkeiten der Erregungsleitung

Art	Gewebe bzw. Organ	mittlere Geschwindigkeit m/s	
Teichmuschel	Nerv	0,05	
Regenwurm	Bauchmark	0,4	
Hummer	Sehnerv	9	
Frosch	Skelettmuskel	3	
Frosch	Ischiasnerv	25	
Pferd	marklose Fasern	8	
Pferd	markhaltige Fasern	30	
Mensch	Skelettmuskel	10	
Mensch	markhaltige Nerven	80 bis 100	
Hafer	Keimscheide (Lichtreiz)	sehr klein	
Hafer	Wurzeln (Schwerkraftreiz)	etwa 0,000005	(= 0,005 mm/s)
Zaunrübe	Ranken	0,00007	(= 0,07 mm/s)
Sonnentau	Randentakel	0,00014	(= 0,14 mm/s)
Mimose	Blätter	0,01 bis 0,1	(= 10 bis 100 mm/s)

Die Leitungsgeschwindigkeit ist von einer Reihe von Faktoren abhängig.

Innerhalb des Tierreiches nimmt die Leitungsgeschwindigkeit mit der Organisationshöhe der Organismen zu. Wie die Tabelle zeigt, schwankt die Leitungsgeschwindigkeit auch bei den verschiedenen Geweben einer Tierart. Die Nervenzellen, die bei den Tieren spezielle Systeme der Erregungsleitung sind, zeigen die höchste Leitungsgeschwindigkeit, wobei die markhaltigen Fasern die marklosen übertreffen. Dicke Nervenfasern leiten die Erregung schneller als dünne (der Regenwurm zum Beispiel hat im Bauchmark drei besonders dicke Fasern, die die Erregung bedeutend schneller leiten als die übrigen Fasern des Bauchmarkes).

Die Leitungsgeschwindigkeit steigt auch mit der Erhöhung der Temperatur, weil Wärmezufuhr den Stoffwechsel der Zelle beschleunigt. Bei Pflanzen ist im Gegensatz zu Tieren auch die Reizintensität für die Leitungsgeschwindigkeit bedeutungsvoll. Die Mimosenblätter zum Beispiel leiten die Erregung normalerweise 4 bis 30 mm/s, bei einer schweren Verletzung bis 100 mm/s.

Die Reaktion

Am Ende der Reizkette, die sich aus Reiz — Erregung — Erregungsleitung zusammensetzt, steht die Reizbeantwortung oder Reaktion. Eine Reaktion erfolgt bei manchen reizbaren Systemen in gleicher Weise auf beliebige Reizarten. Amöben ziehen ihre Füßchen ein, unabhängig davon, ob mechanische Reize, chemische Reize, Strahlungsreize oder andere sie treffen. Sie strecken sie bei Nahrungsreizen aus. Ebenso geläufig ist uns, daß die Tentakel des insektenfangenden Sonnentaus (*Drosera*) auf alle Reizungen Fangbewegungen ausführen.

Daß ein reizbares Gebilde auf die verschiedenartigsten Reize reagiert, zeigt sich auch, wenn man einen kranken Zahn besitzt, bei dem der Nerv fast frei liegt. Man spürt dann, daß sowohl warme als auch kalte Speisen auf den Nerv wirken, daß er berührungsempfindlich ist, daß er auf Chemikalien, etwa Alkohol oder Gewürze, anspricht. Auch der osmotische Druck konzentrierter Zuckerlösungen wird registriert, und schließlich testet der Zahnarzt den Nerv häufig elektrisch.

Es gibt auch Organsysteme, die auf eine Reizart besonders empfindlich reagieren. So sind die Sinneszellen des Ohres sehr empfindlich für Schallreize. Solche auf einzelne Reizarten spezialisierten Systeme haben sich besonders im Tierreich im Laufe der Stammesgeschichte herausgebildet (Sinnesorgane).

Die Organismen können auf Reize verschieden reagieren. Die Reaktionen können Stoffwechseländerungen, Formveränderungen oder Bewegungen sein. Häufig treten alle Veränderungen gleichzeitig auf.

Stoffwechseländerungen sind der direkten Wahrnehmung sehr häufig entzogen, vor allem dann, wenn sie auf innere Reize hin zu einer nicht sofort offensichtlichen Reaktion führen. Auch die Formveränderungen und Bewegungen beruhen letztlich auf Stoffwechselreaktionen.

Abb. 43 Plasmabewegung bei einer nackten Amöbe (Formveränderung) Die Pfeile deuten die Bewegungsrichtung an.



Formveränderungen als Reizreaktion

Man beobachtet Formveränderungen zum Beispiel bei Amöben, die ihre Scheinfüßchen einziehen oder ausstrecken (Abb. 43). Bei Pflanzen sind Abweichungen von der normalen Gestalt auf Grund besonders stark wirkender Reize bekannt. Kartoffeln, die im Keller austreiben, bilden lange blattlose Sprosse.

Bewegung als Reizreaktion

Die verschiedenartigen Bewegungserscheinungen in der lebenden Natur unterteilt man in passive und aktive Bewegungen.

Aktive Bewegungen beruhen auf Stoffwechselfvorgängen; sie werden durch Reize gesteuert. Hierzu gehören: die Protoplasmbewegung, die Flimmerbewegung, die Muskelbewegung, die Bewegungserscheinungen bei der Zellteilung, die meisten Bewegungen von Pflanzenorganen u. a.

Passive Bewegungen vollführen Organismen oder deren Teile, wenn andere Systeme Energie auf sie übertragen. Passiv bewegt werden beispielsweise die Körperflüssigkeiten der Tiere (Blut, Lymphe, Harn u. a.), auch die hygroskopischen Bewegungen von toten Pflanzenzellen gehören hierher. Die passiven Bewegungen vollziehen sich nach den gleichen Gesetzen, die für die Bewegungen nichtlebender Körper gültig sind; sie gehören nicht zu den Reizreaktionen.

Aktive Ortsbewegungen, beispielsweise die Fortbewegung der Tiere, kommen durch die Tätigkeit aktiver Bewegungsmechanismen zustande. Vielfach sind Bewegungsorgane ausgebildet. Diese können allein aus dem aktiven Bewegungsmechanismus bestehen, beispielsweise wirkt ein Flimmer als Ruder. Bei den meisten Bewegungsorganen sind aber die Bewegungsmechanismen mit anderen Körperelementen gekoppelt (z. B. Muskeln und Knochen in den Gliedmaßen).

Flimmerbewegung. Bewegungen, die auf Schwingungen von Zellfortsätzen (Flimmern) beruhen, sind in der lebenden Natur weitverbreitet. Sind die Zellfortsätze im Verhältnis zur Zelle lang, so nennt man sie Geißeln, sind sie kurz, dann heißen sie Wimpern (Cilien).

Viele Bakterien besitzen Geißeln. Geißelträger (z. B. Geißelalgen) bewegen sich durch Geißeln, die Wimpertierchen (z. B. Pantoffeltierchen) mit Hilfe ihrer Wimpern fort. Viele Fortpflanzungsstadien verschiedener Einzeller und die Samenfäden (Spermatozoen) der vielzelligen Tiere und mancher Pflanzen (z. B. der Moose) sind begeißelt.

Nicht nur einzelne Zellen, sondern auch mehrzellige Organismen können mit Wimpern bedeckt sein. Bei Bachstrudelwürmern beispielsweise ist die Oberfläche mit Wimpern bedeckt. Die Wimpern unterstützen die Fortbewegung dieser Tiere. Viele Gewebezellen, die Körperhölräume auskleiden, tragen Cilien (Kiemenkorb, Darm, Luftröhre, Ausscheidungsorgane; Abb. 44 u. 45).

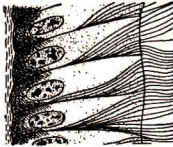


Abb. 44 Flimmerzellen aus dem Lebergang einer Schnecke

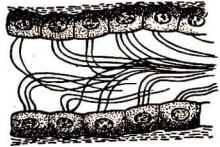


Abb. 45 Flimmerzellen aus dem Nierenkanal eines Schwanzlurchs

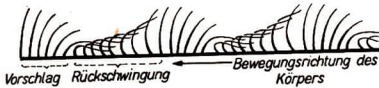


Abb. 46 Wimperschlag eines Pantoffeltierchens

Aufgabe

Beobachten Sie bewimperte oder begeißelte Einzeller mit dem Mikroskop!

Sowohl Geißeln als auch Wimpern sind fadenförmige Fortsätze der äußeren Plasmahaut der Zelle. Am Grund der Geißel oder Wimper liegt im Zellplasma ein Basalkorn.

Geißeln liegen meist am Vorderende des Organismus. Die Geißelbewegungen sind mannigfaltig, es kommen Ruder-, Schlängel- und Rotationsbewegungen vor. Die Bewegungen bewirken, daß der Organismus nach vorn, geißelwärts, gezogen wird. Bei den Spermatozoen liegt die Geißel am Hinterende und führt Schlängelbewegungen aus, die das Köpfchen nach vorn schieben. Wimpern vollführen Ruderbewegungen in einer Ebene (Abb. 46). Die Wimper vollzieht zunächst einen raschen Vorschlag, danach einen langsamen Rückschlag, so daß sie die Ausgangslage wieder erreicht. Beim Vorschlag bleibt die Wimper steif, dann erschlafft sie und vollzieht die Rückenschwingung so, daß sie dem Wasser wenig Widerstand bietet.

Geißeln oder Wimpern tragende Einzeller bewegen sich sehr viel schneller als amöboide Zellen. Das Rotäuglein legt etwa 10 mm/min zurück; das entspricht je Sekunde der vierfachen Körperlänge. Das Pantoffeltierchen bewegt sich 60 mm/min vorwärts, das ist das Fünffache der Körperlänge je Sekunde. Für Fischspermatozoen wurden 2 bis 10 mm/min gemessen.

Der Wimperschlag von Epithelien bei vielzelligen Tieren wird nicht durch das Nervensystem gesteuert. So schlagen die Wimpern auch noch eine Zeitlang weiter, wenn der Organismus tot ist. Obwohl meist keine Steuerung durch das Nervensystem erfolgt, schlagen die Wimpern eines Flimmerepithels koordiniert. Die abgestimmte Schlagfolge kommt dadurch zustande, daß Reize von einer Wimper ausgehen, die auf benachbarte wirken und deren Tätigkeit regulieren.

Muskelbewegung. Muskelbewegung finden wir bei mehrzelligen Tieren fast überall. Lediglich bei den Schwämmen wurden bisher keine echten Muskelzellen gefunden, doch auch bei ihnen gibt es kontraktile Elemente.

Aufgabe

Kennzeichnen Sie den unterschiedlichen Aufbau von glatter und quergestreifter Muskulatur!

Muskelkontraktion. Die Muskeln kontrahieren sich, wenn sie erregt werden. Reize, die eine Erregung auslösen, können verschiedener Art sein (s. S. 81). Im Experiment wendet man meist die elektrische Reizung an. Vom Reiz bis zum Reaktionsbeginn verstreicht eine gewisse Zeit, die Latenzzeit (s. S. 83). Sie beträgt 0,001 bis 0,01 Sekunden. An die Latenzperiode schließt sich die Kontraktion an. Anschließend an eine Reizung ist der Muskel eine kurze Zeit (beim Skelettmuskel 0,001 bis 0,01 Sekunde) unempfindlich für weitere Reize.

Im übrigen gelten für die Reizung und Reaktion des Muskels die allgemeinen Reizgesetze. So muß der Reiz, wenn er zur Muskelkontraktion führen soll, eine Minimalstärke (Schwellenwert) überschreiten. Jede Muskelfaser eines Muskels hat eine eigene Reizschwelle. Es ist möglich, daß ein Reiz nur einen Teil der Muskelfasern zur Kontraktion anregt; wird der Reiz verstärkt, so kontrahieren immer mehr Muskelfasern.

Der Tetanus. Folgen mehrere Reize aufeinander, so entsteht eine Serie von Einzelzuckungen (Abb. 47). Verkürzt sich der Abstand zwischen den Reizen, so wird schließlich ein Zeitpunkt erreicht, in dem der Muskel sich von neuem kontrahiert, noch bevor er vollständig erschlafft ist. Dabei bauen sich verschiedene Kontraktionen übereinander auf. Wenn die Abstände zwischen den Reizen weiter verringert werden, verschmelzen die Einzelzuckungen zur Dauerkontraktion. Eine solche lang andauernde Kontraktion, die durch die Summierung vieler Einzelreize zustande kommt, wird Tetanus genannt (Abb. 47). Die meisten Muskelkontraktionen an der Skelettmuskulatur sind tetanische Kontraktionen. Echte Einzelzuckungen sind selten (z. B. einige Reflexzuckungen).

Muskeltonus. Die Muskeln befinden sich im Ruhezustand in einer vom Nervensystem unterhaltenen reflektorischen Dauerspannung (Tonus). Dieser Tonus wird durch Erregungen bewirkt, die von den sensiblen Endorganen in Muskeln und Sehnen zum Zentralnervensystem und von hier zu den Muskeln fließen. Das Zentralnervensystem entsendet dann seinerseits Impulse, die den Tonus verändern. Läßt man die Arme herabhängen, so sind sie in den Ellbogengelenken leicht gebeugt. Der Tonus der Beugemuskeln ist stärker als der der Streckmuskeln. Durch den Tonus der Kaumuskeln sinkt der Unterkiefer nicht herab.

Der Muskeltonus ist bei starken und gesunden Menschen höher als bei schwa-

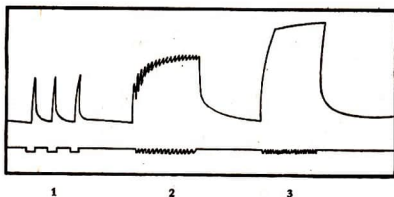


Abb. 47 Aufzeichnung der Kontraktionen eines Muskels
1 bei drei einzelnen Reizen mit großem zeitlichen Abstand, 2 bei einer Reizserie von 20 Reizen in einer Sekunde, 3 bei 50 Reizen in einer Sekunde (die untere Linie zeigt die Reizmarkierung)

chen. Aber auch bei jedem einzelnen Menschen ändert sich der Muskeltonus. Bei Ermüdung oder Depression sinkt er ab. Der Muskeltonus beeinflusst auch die Körperhaltung eines Menschen. Ein Mensch mit niedrigem Tonus hält sich gebeugt. Die Schwächung des Tonus der Gesichtsmuskeln spiegelt sich auch im Ausdruck des Gesichts wider. Während des Schlafes sinkt der Muskeltonus stark herab.

Bei glatten Muskeln gibt es eine „tonische“ Muskelverkürzung, ohne daß mit der Dauerverkürzung eine wesentliche Stoffwechselsteigerung verbunden ist. So wird der Dauertonus des Magenschließmuskels oder der Muskeln der Gefäßwände ohne Energieaufwand aufrechterhalten. Bei Skelettmuskeln gibt es keine Dauerkontraktionen ohne Stoffwechselsteigerung, die den Dauerverkürzungen der glatten Muskulatur vergleichbar sind. Alle dauernden Muskelanspannungen, die beim Stehen, Laufen oder Sitzen notwendig sind und unbewußt ausgeführt werden, erfordern einen erhöhten Energieaufwand. Die Muskelanspannungen, die einem ständigen Wechsel unterworfen sind, bilden die Basis für alle willkürlichen und reflektorischen Bewegungsvorgänge.

Wir können zwei verschiedene Arten von Muskelkontraktionen unterscheiden. Der Unterschied zwischen beiden Kontraktionen wird an folgendem einfachen Beispiel deutlich: Wenn wir Holz hacken oder Sand schaufeln, leisten wir Muskelarbeit. Wir leisten aber auch Muskelarbeit, wenn wir einen schweren Koffer tragen, obwohl unser Arm dabei scheinbar in Ruhe ist, die Muskeln sich also scheinbar nicht kontrahieren.

Chemische Vorgänge bei der Muskelkontraktion. Ein Reiz löst im Muskel eine Reihe physikochemischer Vorgänge aus, die eine Kontraktion des Muskels bewirken. Bei diesen Vorgängen wird stets Energie frei, ein Teil der frei werdenden chemischen Energie wird in Wärme umgewandelt. Der andere Teil (etwa 30%) wird unmittelbar als mechanische Arbeit wirksam.

Die Energie für seine Tätigkeit erlangt der Muskel fast ausnahmslos durch den Abbau von Kohlehydraten. Meist handelt es sich um Glucose, die in Form von Glykogen gespeichert wird.

Die Stoffwechselfähigkeit im Muskel ist während der Kontraktion (Arbeitsphase) anders als nach der Kontraktion (Erholungsphase).

Arbeitsphase des Muskels:

Glykogen (bzw. Glucose) wird zu Milchsäure abgebaut; bei diesem Vorgang wird Energie frei. Der Prozeß verläuft ohne Sauerstoff (anaerob), er wird als Glykolyse bezeichnet. Die freiwerdende Energie kann nicht unmittelbar in Muskelarbeit umgesetzt werden. Die unmittelbare Energiequelle für den Muskel bildet vielmehr eine energiereiche organische Phosphorverbindung (Adenosintriphosphorsäure, ATP). Diese Substanz spaltet Phosphorsäure ab, dabei wird Energie frei, die vom Muskel genutzt werden kann. Die Energiemenge, die beim Abbau von Glykogen freigesetzt wird, dient dazu, die energiereichen organischen Phosphorverbindungen (ATP) wieder aufzubauen. Andere organische Phosphorverbindungen sind als Energiespeicher in der Arbeitsphase des Muskels bedeutungsvoll.

Erholungsphase des Muskels:

Nach der Kontraktion werden von der im Muskel stark angereicherten Milchsäure etwa 20% zu Kohlendioxyd und Wasser oxydiert. Dies ist also ein aerober Vorgang.

Der größere Teil der Milchsäure wird wieder zu Glykogen umgebaut. Milchsäureoxydation und Glykogenbildung erfolgen zum größten Teil in der Leber (dorthin wird die Milchsäure durch das Blut transportiert), zum geringeren Teil im Muskel selbst. Die Energie zur Glykogenbildung wird durch die Oxydation der Milchsäure gewonnen. Das Glykogen steht dem Muskel wieder zur Arbeit zur Verfügung, es kann aus der Leber, nach Aufspaltung in Glucosemoleküle, mit dem Blut zum Muskel befördert werden.

Ein anderer Teil der Energie, die aus der Milchsäureoxydation gewonnen wird, dient zum Wiederaufbau der energiereichen Phosphorverbindungen.

Wenn wir die chemischen Bestandteile eines Muskels vor der Arbeitsphase und nach der Erholungsphase vergleichen, so stellen wir fest, daß nur die Glykogenmenge geringer geworden ist. Somit leistet der Muskel Arbeit auf Kosten des Glykogens. Es muß aber hervorgehoben werden, daß die Energie des Glykogens erst über die energiereichen Phosphorverbindungen genutzt werden kann, der Glykogenabbau spielt in der Muskel-tätigkeit nur eine indirekte Rolle. Wenn der Glykogenabbau künstlich unterbrochen wird, vermag der Muskel dennoch Arbeit zu leisten, bis die Energie der organischen Phosphorverbindungen erschöpft ist.

Die Tatsache, daß die Energie für die Arbeitsphase ohne Sauerstoffverbrauch gewonnen wird, hat große Bedeutung für den Sport. Nur so ist es möglich, kurze, sehr anstrengende Übungen, wie zum Beispiel einen 100-m-Lauf, auszuführen. Die Sauerstoffaufnahme ist auf dieser Strecke ganz unbedeutend (kaum ein Liter). Der für die Erholungsphase zur Verbrennung der entstandenen Milchsäure erforderliche Sauerstoff (etwa 8 l) wird erst nach dem Lauf eingeatmet, was etwa zwei Minuten dauert.

Ermüdung des Muskels. Die Ermüdung des Muskels hat verschiedenartige Ursachen. Beispielsweise können die Glykogenreserven erschöpft sein. Das tritt jedoch selten ein, da dem Muskel mit dem Blut laufend neue Nahrungsstoffe zugeführt werden.

Bei längerer Tätigkeit vermehren sich aber Abbauprodukte im Muskel (Kohlendioxyd, Milchsäure, Phosphorsäure u. a.) und werden nur ungenügend vom Blut abtransportiert. Noch viel wesentlicher für das Auftreten von Ermüdungserscheinungen scheint aber die Änderung im Kolloidzustand der Eiweiße zu sein.

Bei den meisten Arbeiten wechseln die beteiligten Muskeln in ihrer Tätigkeit ab und ermüden deshalb nicht so rasch. Daher strengt ein ruhiges Gehen weniger an als langes Stehen. Herz und Atemmuskeln ermüden auch deshalb nicht, weil in den kurzen Pausen zwischen den einzelnen Herzschlägen und Atemzügen genug Zeit zur Erholung bleibt.

Ebenso wie lang andauernde Arbeit führt auch eine übermäßige Belastung der Muskeln oder Beschleunigung des Tempos der Muskelbewegungen zu schnellerer Ermüdung und zu einem plötzlichen Abfall der geleisteten Arbeit. Es ist deshalb wichtig für jede körperliche Arbeit, die Geschwindigkeit der Bewegung und die Belastung der Muskeln so zu regeln, daß die größte Leistung bei geringster Ermüdung erreicht wird.

Die Ermüdung eines Muskels kann durch Training stark verzögert werden. So tritt auch der „Muskelkater“, ein schmerzhaftes Anzeichen starker Muskelübermüdung, bei Sportlern erst nach einer länger anhaltenden starken Beanspruchung auf.

Die Reizbeantwortung bei Pflanzen

Die Reizvorgänge bei Pflanzen unterscheiden sich von denen bei Tieren vor allem durch zwei Merkmale. Pflanzen besitzen keine spezialisierten Bahnen für die Erregungsleitung, die den tierischen Nerven entsprechen würden. Die Erregung wird von Zelle zu Zelle weitergegeben. Als Folge davon verlaufen die Erregungsvorgänge bei Pflanzen wesentlich langsamer als im Tierreich.

Pflanzen besitzen keine besonderen Organe für die Bewegung, wie sie die Tiere in den Muskeln besitzen. Die Bewegungen der Pflanzen verlaufen daher in ganz anderer Weise als die der Tiere.

Die Bewegungen lebender Pflanzenteile kann man in Wachstumsbewegungen und Turgorbewegungen unterteilen.

Wachstumsbewegungen. Sprosse von Zimmerpflanzen neigen sich oft dem Fenster zu; keimende Kartoffeltriebe im Keller wachsen zum Licht hin; bei den meisten Pflanzen wächst der Hauptsproß senkrecht nach oben, die Wurzel entgegengesetzt in den Boden hinein; die Blütenblätter der Tulpe und anderer Pflanzen öffnen sich morgens und schließen sich am Abend wieder; Kletterpflanzen winden sich um eine Stütze, das sind einige Beispiele pflanzlicher Wachstumsbewegungen. Sie alle beruhen darauf, daß die Teile der Pflanze unter dem Einfluß von Umweltbedingungen und bestimmter Wachstumsstoffe ungleichmäßig wachsen; dadurch kommt es zu charakteristischen Krümmungen. Bestimmend ist das Verhalten der Wuchsstoffe (s. S. 73).

Wuchsstoffe beeinflussen das Streckungswachstum der Zellen. Wachstumsbewegungen treten daher nur an jungen Pflanzenteilen auf, deren Wachstum noch nicht abgeschlossen ist.

Lichtwendiges Wachstum (Phototropismus). Licht zerstört oder hemmt die Wirkung der Wuchsstoffe. Das Streckungswachstum junger Sprosse wird daher auf der lichtzugewandten Seite gehemmt, auf der lichtabgewandten Seite jedoch unvermindert fortgesetzt. Diese Seite wächst stärker, und der Sproß krümmt sich mit der Spitze dem Lichte zu.

Ähnlich verhält es sich mit den Blütenbewegungen der Tulpe. Morgens wachsen die lichtabgewandten Innenseiten der Blütenblätter der Tulpe stärker, dadurch öffnen sich die Blüten. Mit abnehmendem Abendlicht können die Außenseiten wieder stärker wachsen, darum krümmen sich die Blütenblätter nach innen.

Erdwendiges Wachstum (Geotropismus). Legt man eine junge, gerade Pflanze waagrecht auf die Erde, so krümmt sich der Sproß nach oben, die Wurzeln wachsen dagegen nach unten in den Boden hinein. Unter dem Einfluß der Schwerkraft reichern sich Wuchsstoffe auf der unteren Seite der Pflanze an. Diese erhöhte Wuchsstoffkonzentration bewirkt im Sproß eine einseitige Wachstumsförderung, die Unterseite wächst stärker, der Stengel krümmt sich nach oben. Die gleich hohe Wuchsstoffkonzentration wirkt aber auf die Wurzel wachstumshemmend. Hier wächst demzufolge die obere Seite ungehindert weiter, und die Wurzel krümmt sich zum Boden hin.

Die Wuchsstoffe werden vor allem in den Sproßspitzen wirksam, wandern von dort gleichmäßig in den Leitungsbahnen nach unten und verteilen sich auf die Seitensprosse.

Sobald man die Spitze eines Baumes kappt, hört der Hauptwuchsstoffstrom von oben auf. Dann kommen die in den Spitzen der Seitentriebe gebildeten Wuchsstoffe voll zur Auswirkung, die Seitenzweige wachsen senkrecht nach oben, so lange, bis einer von ihnen die anderen überragt und damit zur neuen Sproßspitze wird.

Bei den windenden und rankenden Pflanzen werden durch Berührungsreize Wuchsstoffverlagerungen ausgelöst, so daß die von der Stütze berührten Seiten langsamer, ihre Gegenseiten dagegen rascher wachsen. Dadurch winden sich beispielsweise Stengel oder Seitentriebe spiralg um eine Stütze.

Wachstumsbewegungen verlaufen langsam; sie finden nur in jungen Pflanzenteilen statt, deren Wachstum noch nicht abgeschlossen ist. Ihr Verlauf wird von der Wirkung der Wachstoffs unter dem Einfluß verschiedener Umweltfaktoren bestimmt.

Turgorbewegungen. Turgorbewegungen sind nicht an Wachstumsvorgänge gebunden. Sie verlaufen weitaus rascher als die Wachstumsbewegungen, mitunter sogar in Bruchteilen von Sekunden.

Turgorbewegungen beruhen auf allmählichen oder plötzlichen Veränderungen der Gewebespannung von Pflanzenteilen.

Wir unterscheiden vor allem langsame Turgorbewegungen und Schleuderbewegungen.

Langsame Turgorbewegungen. Hierher gehören die „Schlafbewegungen“ vieler Pflanzen, die bei Nacht ihre Blattstiele senken (Abb. 48). In zahlreichen Blüten werden die Staubblätter bei Berührung durch Insekten ruckartig bewegt (Abb. 49). Auch langsame Turgorbewegungen laufen also mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ab.

Am bekanntesten und am genauesten untersucht sind die Bewegungen der Sinnerpflanze oder Mimose (Abb. 50). Kneift man ein Blättchen am äußersten Rand einer Seitenfieder mit einer Pinzette, so klappen die Blättchen der ganzen Fieder der Reihe nach von der Spitze zur Basis zusammen. Dann beginnen die benachbarten Seitenfiedern

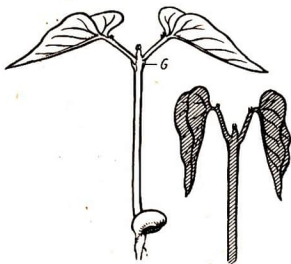


Abb. 48 Turgorbewegung (Bohnenblatt). Links: Tagstellung; rechts: Nachtstellung. G Gelenkpolster

Abb. 49 Turgorbewegung (Berberitzenblüte)
Das gereizte Staubgefäß ist gegen den Fruchtknoten geklappt



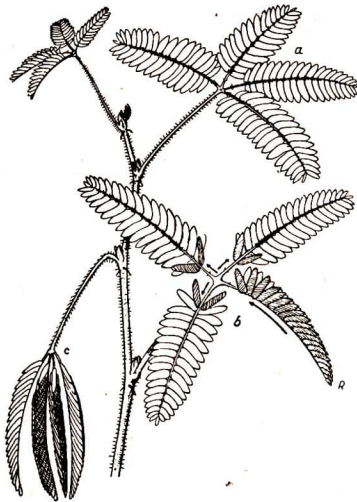


Abb. 50 Zweig einer Sinnpflanze (Mimose)
 a Blatt ungeritzt, b Blatt während der Bewegung, c Blatt nach
 Ablauf der Reizbewegung. R Reizstelle, → Ablaufrichtung der
 Bewegung

in entgegengesetzter Richtung mit den gleichen Klappbewegungen, am Ende senkt sich der ganze Blattstiel in seinem Hauptgelenk nach unten (Abb. 50).

Diese Bewegung verläuft unabhängig von der Art des Reizes. Man kann die gleiche Wirkung erzielen, wenn man ein Fiederblättchen berührt, ansengt oder mit elektrischem Strom reizt. Wird die ganze Pflanze stark erschüttert, so klappen ruckartig alle Blättchen zusammen, und die Blattstiele senken sich. Der Reiz wird dabei mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/s bis auf 50 cm Entfernung weitergeleitet. (Damit werden schon Geschwindigkeiten tierischer Erregungsleitung erreicht: Flußmuschel 5 cm/s.)

An der Mimose gelang es auch, das Wandern einer Erregungssubstanz direkt nachzuweisen. Durchschneidet man einen Seitenzweig, verbindet die Stücke durch ein wassergefülltes Glasröhrchen und reizt dann die Blätter an der Spitze des durchschnittenen Triebes, so klappen auch die Blättchen des

Haupttriebes zusammen, sobald sich die Erregungssubstanz über das wassergefüllte Glasröhrchen in die anderen Pflanzenteile ausgebreitet hat.

An der Bewegung der Mimosenblätter sind eine ganze Reihe komplizierter Vorgänge beteiligt, im wesentlichen handelt es sich um folgenden Mechanismus:

Die Blattstiele und Blättchen werden durch Gelenke in ihrer Lage gehalten. Die Gelenke bestehen aus je zwei polsterartigen Gewebekörpern, die aus großen Zellen mit dünnen, sehr dehnbaren Wänden bestehen. Die Gelenkpolster liegen beiderseits des festen Leitstranges in der Mitte des Blattstiels. Die Zellen beider Polster besitzen eine hohe Saugkraft, sie suchen sich auszudehnen. Im gespannten Zustand drücken beide Gelenkpolster gegeneinander und halten dadurch den Blattstiel in seiner normalen Schräglage.

Bei einer Erschütterung oder einem anderen Reiz erhöht sich die Durchlässigkeit der Plasmagrenzschichten in den Zellen des unteren Gelenkpolsters. Wasser und Salze treten aus den Zellen aus, sie verlieren an Inhalt, ihr Turgor sinkt. Damit sinkt auch der Druck auf das obere Gelenkpolster, dieses

kann sich ausdehnen und erhebliche Mengen an Wasser aufnehmen. Der ganze Blattstiel wird so nach unten gedrückt; umgekehrt laufen die Vorgänge bei den Fiederblättchen, die nach oben zusammenklappen.

Die Plasmagrenzschichten werden durch den Reiz vorübergehend verändert. Dies löst eine verstärkte Stoffwechsellätigkeit aus (meßbar durch erhöhte Atmung), die zu einer allmählichen Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes der Plasmagrenzschichten führt. Sobald dieser erreicht ist, können die Zellen des unteren Gelenkpolsters erneut Wasser aufnehmen, sich ausdehnen und den Blattstiel wieder hochdrücken.

In ähnlicher Weise bewegen sich die Klappfallenblätter mancher insektenfangenden Pflanzen, beispielsweise der nordamerikanischen Venusfliegenfalle, die bei uns in Gewächshäusern gezogen wird. Durch Gelenkpolster sind die beiden Blatthälften zunächst auseinandergedrückt und werden in diesem gespannten Zustand gehalten. Wenn ein Insekt die aus der Blattspreite herausragenden Sinnessaare berührt, wird ein Reiz ausgelöst, durch den die Gelenkpolster auf der Innenseite der Blätter ihre Gewebespannung verlieren. Die Blatthälften klappen mit einem Ruck zusammen, wobei die Randzähne ineinandergreifen und das Insekt gefangenhalten, bis es von den aus den Blattzellen abgeschiedenen Drüsensekreten verdaut wird (Abb. 51).

Zu den langsamen Turgorbewegungen zählen auch die Bewegungen der Schließzellen. Diese haben unterschiedlich dicke Zellwände und sind gekrümmt. Dieser besondere Wandbau bedingt, daß bei voller Zellspannung der Spalt zwischen den beiden Schließzellen geöffnet ist, bei nachlassendem Turgor sich jedoch schließt.

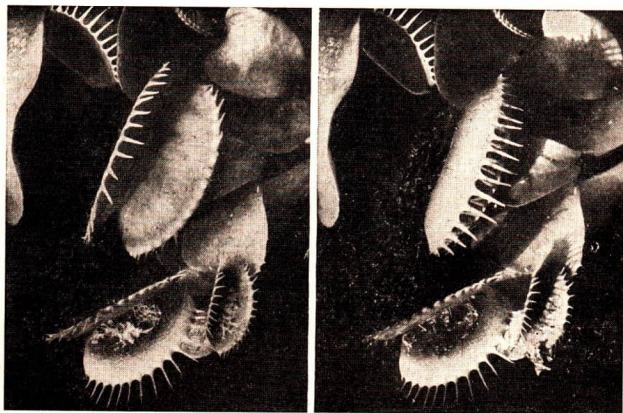


Abb. 51 Venusfliegenfalle. Links: mittleres Blatt geöffnet; rechts: nach Reizung geschlossen; Blatt unten mit Resten eines verdauten Insekts

Schleuderbewegungen. Eine ähnliche Mechanik finden wir bei zahlreichen Einrichtungen zum blitzartigen Ausschleudern von Samen aus reifen Früchten.

Die Schleudereinrichtungen sind äußerst vielseitig gebaut, sie funktionieren jedoch alle nach dem gleichen Prinzip: Während des Wachstums tritt in der Fruchtwand eine Spannung auf, ähnlich wie etwa eine Stahlfeder gespannt wird. Bei der Reife kommt es zu einer Formveränderung, bei der sich die Zellen entspannen.

Bekannt ist die Samenverbreitung des Springkrauts, das an schattigen Stellen unserer Laubwälder wächst.

Der Fruchtknoten besteht hier aus fünf verwachsenen Fruchtblättern. In den Fruchtblättern grenzt an einen inneren, steifen Strang aus Festigungsgewebe mit dicken Wänden ein außen gelegenes Schwellgewebe, dessen große, dünnwandige Zellen infolge ihres hohen Zuckergehaltes eine hohe Saugkraft besitzen.

Während der Fruchtreife nimmt die Saugkraft in den Zellen des Schwellgewebes durch Anreicherung organischer Säuren von 9 auf 14 at zu. Diese Zellen nehmen Wasser auf, dehnen sich sehr stark aus. Da sie sich durch ihre Verbindung mit dem Festigungsgewebe nicht in Längsrichtung dehnen können, geschieht dies in Querrichtung, dadurch reißen die Nähte zwischen den Fruchtblättern auf, bis diese schließlich nur noch an der Spitze locker zusammenhalten.

Reißt diese Verbindung durch Berührung oder Überdruck, dann liegen die Fruchtblätter einzeln, und ihr Festigungsstrang kann nach innen zusammengedrückt werden. Die Schwellgewebe dehnen sich sofort um 32% in der Längsrichtung aus, und jedes Fruchtblatt rollt sich blitzartig nach innen ein. Dadurch werden gleichzeitig die an der Mittelspindel sitzenden Samen ausgeschleudert.

Hygroskopische Bewegungen. An trockenen Kiefern- oder Fichtenzapfen sind die verholzten Schuppen auseinandergespreizt, im Wasser schließen sie sich zusammen. Auf ähnliche Weise bewegen sich unter dem Einfluß wechselnder Feuchtigkeit die toten Blütenkörbchen der Strohlume, die Zähne an den Mooskapseln und Teile vieler Fruchtkapseln. Die Grannen der Reiherschnabelfrüchte sind im trockenen Zustand korkzieherartig eingerollt, im feuchten Zustand strecken sie sich gerade, so daß man sie als einfachen Feuchtigkeitsanzeiger verwenden kann (Abb. 52).

Bei diesen Bewegungen handelt es sich nicht um Reizvorgänge in lebenden Pflanzen, sondern um Bewegungen toter Pflanzenteile. Diese Bewegungen kommen dadurch zustande, daß die toten Zellwände infolge besonderer Baueigentümlichkeiten in unterschiedlicher Weise Wasser aufnehmen und quellen. Dadurch kommt es zu den oft sehr kompliziert aussehenden Krümmungsbewegungen. Solche von der Feuchtigkeit abhängigen Bewegungen nennt man hygroskopische Bewegungen.



Abb. 52. Hygroskopische Bewegung
Teilfrucht des Reiherschnabels. Links: trocken, eingerollt; rechts:
feucht, gestreckt

Vergleichende Betrachtungen der Reizvorgänge bei Pflanzen und Tieren

Die Reizvorgänge bei Pflanzen und Tieren unterscheiden sich in mehrfacher Hinsicht voneinander:

1. Tiere (und einige Einzeller) besitzen differenzierte Zellen oder Zellteile, die durch bestimmte Reizarten besonders leicht erregt werden (Sinneszellen) oder Rezeptoren). Die Reize, für die Rezeptoren besonders empfänglich sind, heißen adäquate Reize. Alle Rezeptoren, die auf einen adäquaten Reiz ansprechen, sind einem Sinn zugeordnet, (z. B. Lichtsinn, Geruchssinn). Häufig sind die für die gleichen Reize empfänglichen Sinneszellen in einem Organ, dem Sinnesorgan, vereint.

Pflanzen besitzen keine Sinnesorgane. Allerdings gibt es auch am Pflanzenkörper Abschnitte, die gegenüber bestimmten Reizen stärker erregbar sind (Keimscheide durch Licht, Wurzeln durch die Schwerkraft).

2. Tiere besitzen spezialisierte Zellen, die eine schnelle Erregungsleitung über große Strecken garantieren — die Nerven. Pflanzen haben keine spezialisierten Bahnen für die Erregungsleitung, die Erregung wird von Zelle zu Zelle weitergegeben. Sofern es sich bei der Erregungsleitung jedoch um einen Transport von Erregungssubstanz (Wuchsstoffe) handelt, kann dieser in den Leitgeweben etwas rascher erfolgen. Die Reizvorgänge bei Pflanzen verlaufen insgesamt langsamer als bei Tieren.

Die Verknüpfung der verschiedenartigen Rezeptoren mit dem Nervensystem ist die Grundlage für die großen sinnesphysiologischen Leistungen der Tiere. Die Rezeptoren vermögen einen adäquaten Reiz in eine Erregung umzuformen, die auf eine anliegende Nervenfasern übertragen und von dieser fortgeleitet wird.

Die Rezeptoren übermitteln der Nervenfasern auch die Intensität des wirkenden Reizes, bei starken Reizen kann man eine größere Anzahl von Aktionsströmen je Sekunde an der Nervenfasern messen als bei schwachen. Wirkt ein Reiz längere Zeit auf einen Rezeptor, so paßt sich dieser an (Adaptation) und wird unempfindlicher gegenüber dem Reiz. Gut bekannt ist die Reizadaptation als sogenannte „Gewöhnung“ an starke Geräusche oder starke Lichtreize.

Rezeptoren können auch durch nicht adäquate (inadäquate) Reize erregt werden. So ruft beispielsweise ein Schlag auf das Auge Lichtempfindungen hervor. Ein inadäquater Reiz muß allerdings bedeutend energiereicher sein als der adäquate Reize, ehe eine Erregung ausgelöst wird. Da ein inadäquater Reiz die gleiche Empfindung auslösen kann wie ein adäquater, das heißt, daß auf verschiedenartige Reizung immer gleichartig geantwortet wird, spricht man von einer „spezifischen Energie der Sinnesorgane“.

Eine gleiche Empfindung bei verschiedenartigen Reizen tritt auf, weil die Rezeptoren lediglich die Reizaufnahme bewerkstelligen, die Empfindung jedoch nach Fortleitung über die Nerven in einem dem Sinnesorgan zugeordneten Zentrum im Gehirn entsteht. Auch einige reizbare Systeme, die nicht zu den Sinnesorganen gehören, reagieren auf alle Reizarten in gleicher Weise. Dies erkannte bereits 1826 der berühmte Physiologe JOHANNES MÜLLER. „Es ist unwesentlich“, schrieb er, „mit welchen Mitteln der

Muskel gereizt wird, ob galvanisch, chemisch oder mechanisch, . . . auf jedliche Art der Reizung, die überhaupt eine Wirkung hervorruft, reagiert er mit einer Bewegung.“ Die gleiche Erscheinung finden wir auch bei Pflanzen. Beispielsweise führen die Tentakel des insektenverdauenden Sonnentaus (*Drosera*) auf alle Reizungen Fangbewegungen aus.

Alle diese Systeme haben sich im Laufe der Jahrtausende während der Stammesgeschichte zu ihrem spezifischen Leistungsvermögen entwickelt.

Idealistische Philosophen vertraten die Meinung, wenn man verschiedenartige Reize (Licht- und Schlagreize beim Auge) gleichartig empfinde, so zeige sich, daß die Sinnesorgane unsere Umwelt nicht richtig widerspiegeln, sondern daß die Sinnesorgane nach eigenen Gesetzen eine Scheinwelt entstehen ließen. Diese Philosophen leugnen, daß man mit den Sinnesorganen die Welt erkennen kann. Sie verschweigen aber, daß verschiedene Sinnesorgane ein gleiches Bild der Umwelt entwerfen (einen Tisch kann man z. B. sehen, aber auch ertasten), und daß normalerweise jedes Sinnesorgan gegen andere Reize geschützt ist (zu den Sinneszellen des Ohres kann z. B. kein Licht vordringen, die knöcherne Augenhöhle und die Augenlider schützen vor mechanischen Reizen). Außerdem vermag der Mensch in seiner praktischen Tätigkeit die Umwelt nach seinen Vorstellungen zu gestalten, was voraussetzt, daß die Umwelt von den Sinnesorganen richtig widerspiegelt worden ist. So bleibt auch in der Reizphysiologie kein Platz für idealistische Auffassungen.

Sachwörterverzeichnis

Das Zeichen * weist auf eine Abbildung hin

- Adaptation 82
Adrenalin 46
Aktionspotential 84
Anästhesie 83
Aminosäuren 7 ff, 27, 57*
Amiotose 20
Amöbe 62*, 84*, 87*
Assimilate 35
Assimilation 27
Assimilationsstärke 36*
Atemung 49, 50, 52, 56
autotroph 28
- Basalkorn 88
Baustoffwechsel 23, 27, 55
Befruchtung 64
Befruchtung, Landorganismen 66
Besamung, Landorganismen 66
Bestäubung, Samenpflanzen 67
Betriebsstoffwechsel 23, 48, 55
Bewegungen 86
Blastula 76
Blattquerschnitt 33*
Bodennährstoffe 73
- Calcium 37
Chemosynthese 28, 34 f
Chitin 10
Chlorophyll 31
Chloroplasten 17*
Chromatin 16
Chromoplasten 17*
Chromosomen 16**, 20*
- Disaccharide 10
Dunkelreaktion 29
- Einschlüsse 18
Einzeller 62*
Eisen 37
Eiweißumsatz 46
Eiweiße 7 ff
Eizellen 64
Eizelltypen 75
Ektoderm 77
Entoderm 77
Entwicklung 62 ff, 78
Erregung 83
Erregungsleitung 84, 85
Basigsäuregärung 55
- Fermente 37
Fette 10 f
Fettsäuren 27
Fettstoffwechsel 58*
Fettumsatz 46
Flimmerbewegung 87
Flimmerzellen 88*
Formänderungen 86
Fortpflanzung 62 ff
Fortpflanzungsorgane 64
Furchung 74 f, 75*
- Gameten 63*
Gärung 53
- Gärung, alkoholische 53
Gärungsvorgänge 54*
Gastrulation 76*, 77 f*
Generationswechsel, Landpflanzen 70
Generationswechsel, Tiere 70
Geschlechtsgeneration 69
Gewebe 20
Glucose 35, 57
Glykogen 10
Glykolyse 50
Grundstoffwechsel 59
- Harnstoff 46
heterotroph 27
heterotrophe Ernährung 38 ff, 47
Hexosen 9
Hormone 45 f
hyroskopische Bewegungen 96*
- Insulin 46
Isotope 28
- Kalium 37
Kannepflanze 39*
Kernschleifen 16
Kernteilung 20*, 66*
Keimpflanzen 63*
Keimblattbildung 76 f
Keimscheibenfurchung 75*
Keimung 72
Keimzellen 63
Kohlendioxid 31
Kohlenhydrate 9 f
Kohlenhydratstoffwechsel 58*
Kohlenhydratumsatz 46
Kohlenstoffassimilation 28
Kreislauf der Stoffe 60*, 61
Kristalle 18
- Lactose 10
Leibeshöhle, primäre 77
Leukoplasten 17
Licht 32, 72
Lichtreaktion 29
Lipoide 10 f
- Magen 41, 42*
Magnesium 37
Maltose 10
Mesoderm 78
Meiose 65
Milchsäuregärung 55
Mimose 94*
Mineralsalze 36 f
Mistel 47*
Mitochondrien 17, 19
Mitose 20*
Monosaccharide 9, 27
Morphologie 4
Morula 76
Muskel, Ermüdung 91
Muskelbewegung 88
- Muskelkontraktion 89 f*
Muskeltonus 89
- Nährstoffe, Aufnahme 44 ff
Auswahlvermögen 14
- Narkose 83
Nebenstoffwechsel 59
Nitratbakterien 35
Nitritbakterien 35
Nitrifikation 35
Nukleoproteide 8, 16, 19
- Ontogenese, Regulationsvorgänge 79
Organbildung 78
Osmoregulation 13 f
- Peptidbindung 7
Pentosen 9
Phosphor 37
Photosynthese 28 ff, 30*, 31, 35, 56
Physiologie 4
Pilzfäden 48*
Plasmagrenzschichten 11 f, 15
Plasmamembranen 11 f
Plasmolyse 15
Plastiden 16, 19
Polysaccharide 10, 27
Proteide 8 f
Proteine 8
Protoplasma 5 ff
- Reaktion 86
Reduktionsstellung 65
Regenerationsvermögen 80
Regulationsvermögen 80
Reiz 81
Reizbarkeit 81
Reizbeantwortung, Pflanzen 92
Reizmenge 82
Reizreaktion, Formveränderungen 87
Reizreaktion, Bewegung 87
Reizvorgänge, Pflanze und Tier 97
Reservestoffe 18
- Saccharose 10
Salze 46 f
Samenbildung 71
Samenzellen 64
Stäurebildung 56
Stäurekreislauf 50, 51*
Schattenpflanzen 32 f
Schleuderbewegungen 96
Schwefel 37
Schwellenreiz 82
Schwellenwert 82
Seegelei, Befruchtung 64*
Sinnpflanze 94*
Sonnenpflanzen 32 f
Sonnentau 39*, 98
Speicherstärke 36*
Sporen 63*
Spurenelemente 6, 37
Stärke 36*
Stickstoff 37

Stickstoffkreislauf 60 f*
Stoffkreislauf 60*
Stoffwechsel 23
Stoffwechseländerungen 86
Stützgewebe 26
Symbiose 48

Temperatur 72
Tetanus 89
Tetrade 65
Triosen 10
Turgorbewegungen 93 f*, 95

Urdarm 77
Urmund 77

Vakuolen 12 f
Venusliegenfälle 95*

Verdauung, Pflanzen 39
Säugetiere 41
Mensch 41

Verdauungsfermente 41 ff
Verdauungstätigkeit 45
Verdauungsorgane 41, 42*
Verdauungsvorgänge 41 ff, 44
Verdunstungsschutz 26
Vermehrung der Zellsubstanz 19
Vielzeller 21*
Vitamine 38

Wachstum 72
Wachstumsbewegungen 92 f
Wachstumsfaktoren 72
Wasser 24 ff*, 31, 46 f, 73
Wasseraufnahme der Zelle 13

Wasserstoff 52*
Wuchsstoffe 73 f*

Zellbestandteile 16
Zelle, Differenzierung 15, 20
Zelle, Pflanzenzelle 13*, 18 f
Tierzelle 12*, 18 f

Zellkern 16
Zellkolonie 21*
Zellplasma 17
Zellsaft 12 f
Zellteilung 19
Zellulose 10
Zellvermehrung 19
Zellwand 18*
Zentralkörperchen 17, 20
Zwischenstoffwechsel 45

Abbildungsnachweis

Fotos und Reproduktionen

Kurt Herschel, Holzhausen bei Leipzig (Abb. 51);
Zentralbild, Berlin (Abb. S. 5).

Zeichnungen

Eberhard Graf, Berlin (Abb. 1 bis 14, 16, 17, 23 bis 47);
Kurt Herschel, Holzhausen bei Leipzig (Abb. 15, 18 bis
20, 48 bis 50, 52); Roland Jäger/Rainer Zieger, Berlin
(Abb. 21, 22).

