

Prof. Dr. Armin Baur M.A.

Vorlesung: Zoologie 2



Bild von Arek Socha auf Pixabay
verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/illustrations/bakterien-medizinische-biologie-3662695/>

Skript zur Vorlesung

für

Masterstudiengang Lehramt Sekundarstufe 1 – Modul BIO 10,
Masterstudiengang Lehramt Grundschule – Modul SU-NT 05B

2. Auflage 2023

Prof. Dr. Armin Baur
Pädagogische Hochschule Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 561
D-69120 Heidelberg
baur@ph-heidelberg.de

Inhaltsverzeichnis

0. Aufbau des Skripts.....	4
1. Bakterien.....	7
1.1 Systematik	7
1.2 Anatomie von Bakterien.....	9
1.3 Fortbewegung	12
1.4 Vermehrung und Sporenbildung.....	13
1.5 Ernährung und Energiestoffwechsel	15
2. Protozoen.....	20
2.1 Systematik	20
2.2 Ernährungsformen	21
2.3 Fortbewegung	22
2.4 Fortpflanzung und Vermehrung.....	24
2.5 Beispielhafte Vertreter	25
3. Wasser-Elektrolyt-Haushalt und Stickstoffausscheidung	30
3.1 Osmoregulation.....	31
3.2 Wasser.....	32
3.3 Elektrolyte	32
3.4 Stickstoffhaltige Exkretionsprodukte	33
3.5 Exkretionsorgane.....	34
4. Fortpflanzung und Entwicklung	40
4.1 Ungeschlechtliche Fortpflanzung.....	40
4.2 Geschlechtliche Fortpflanzung	43
4.3 Entwicklung zum Embryo	45

5. Lernen und Intelligenz	51
5.1 Lernen.....	51
5.2 Intelligenz	59
6. Sinnesorgane Teil I: Lichtsinnesorgane	64
6.1 Grundwissen Licht und Optik	64
6.2 Vorgänge bei der Aktivierung eines Photorezeptors	66
6.3 Lichtsinnesorgane.....	68
7. Sinnesorgane Teil II: Hörsinnesorgane	76
7.1 Grundwissen Schall	76
7.2 Grundtypen der Hörsinnesorgane	77
7.3 Das Ohr bei Wirbeltieren.....	78
7.4 Hörsinnesorgane der Insekten	80
7.5 Elefanten hören mit den Füßen	82

Aufbau des Skripts

Jedes Kapitel des Skripts gliedert sich in 6 Textelemente:

- (1) Einführung
- (2) Inhaltliche Lernziele
- (3) Text
- (4) Nachbereitung / Übung
- (5) Literaturverzeichnis
- (6) Abbildungsverzeichnis

(1) Einführung:

In wenigen Sätzen wird in den Inhalt des Kapitels eingeführt.

(2) Inhaltliche Lernziele:

In jedem Kapitel werden die inhaltlichen Lernziele zum Kapitel aufgelistet.

Zusätzlich wird über die Veranstaltung die Ausbildung/Weiterentwicklung prozeduraler Kompetenzen (siehe Modulhandbuch) angestrebt.

5. Lokomotion

Ein Kennzeichen der Tiere ist ihre Fähigkeit, sich aktiv durch eigene Muskelkraft von einem Ort zu einem anderen Ort fortzubewegen. Fortbewegung wird fachsprachlich als Lokomotion bezeichnet. Obwohl die Fähigkeit zur Fortbewegung eines der Kennzeichen der Tiere ist, gilt dieses Kennzeichen nicht für alle Tiere. Manche Tiere können sich nicht aktiv fortbewegen und sind am Bodengrund oder an anderen Tieren fest verankert. Fortbewegung kann in unterschiedlichen räumlichen Ebenen stattfinden: So bewegen sich Tiere in der Luft, auf der Erde, unter der Erde, auf dem Wasser, unter dem Wasser wie auch in pflanzlichen und tierischen Körpern fort. Die Fortbewegung muss von anderen Körperbewegungen (Bewegung des Darms, des Magens, des Kiefers, der Fangorgane etc.) abgegrenzt werden. Bewegung ist nicht immer mit Fortbewegung gleichzusetzen, auch wenn es anatomische und physiologische Ähnlichkeiten gibt. Fortbewegung ist eine Teilmenge der Bewegung.



Abb. 5.1: Fliegender Uhu
Bubo bubo

Bild: Alexa_Fotos, 2017

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die unterschiedlichen Fortbewegungsarten aufzählen;
 - die Aufgabe eines passiven Bewegungsapparats erklären;
 - die verschiedenen Formen eines passiven Bewegungsapparats darlegen;
 - die Muskelkontraktion (Physiologie) erklären.

5.1 Fortbewegungsarten

(A) Vagil

Als vagil bezeichnet man Tiere, die sich aktiv fortbewegen können. Zur Fortbewegung setzen Tiere das Fliegen, Schwimmen, Kriechen, Schlängeln, Gehen, Laufen, Springen, Klettern oder Graben ein. Man kann oft nicht nur eine Form bei einem Tier vorfinden, so können beispielsweise Vögel fliegen, aber auch laufen oder gar klettern.

- **Fliegen:** Um sich in der Luft fortzubewegen, müssen Tiere leicht gebaut sein. Die Masse wird von der Erdanziehung nach unten gezogen, die



(3) Text:

Nach den Lernzielen beginnt der ‚Haupttext‘.

(4) Nachbereitung / Übung:

Dieses Textelement untergliedert sich in zwei Subelemente:

(4.1) Erklären / definieren von grundlegenden Begriffen

(4.2) Fragen und Aufgaben

(4.1) Erklären / definieren von grundlegenden Begriffen:

Dieses Element ist in jedem Kapitel enthalten, damit sich der Leser noch einmal (vertieft) mit grundlegenden Begriffen, die im Zusammenhang zum Inhalt des Kapitels stehen, auseinandersetzt. Dieses Element zielt auf den Aufbau eines Fachvokabulars.

(4.2) Fragen und Aufgaben:

Die Aufgaben und Fragen zum Kapitel leiten die Auseinandersetzung mit dem Inhalt des Kapitels an. Die Aufgaben und Fragen sind auch zur Wiederholung bzw. zur Vorbereitung auf die Klausur geeignet.

Aufgaben, die mit einem roten Punkt [●] gekennzeichnet sind, erfordern die Einbeziehung von Zusatzliteratur (Recherche in Fachliteratur).

**Nachbereitung / Übung****Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:**

aktiver Transport	Exocytose	Phospholipiddoppelschicht
Carrier	Gap junction	Prokaryot
Desmosomen	Gewebe	Tight junction
Diffusion	Osmose	Tunnelprotein
Endocytose	Passiver Transport	
Eukaryot	Phagocytose	

Aufgabe 2:

- (1) Welche Zellbestandteile gibt es in einer tierischen Zelle?
- (2) Worin unterscheidet sich eine tierische von einer pflanzlichen Zelle?
- (3) Welche Aufgaben/Funktionen haben die einzelnen Zellbestandteile?
- (4) Wie ist die Zellmembran aufgebaut?
- (5) Welche Vorteile bietet der Bau der Zellmembran? [●]
- (6) Welche Transportvorgänge in die Zelle bzw. aus der Zelle gibt es?
- (7) Wie funktionieren die bei (6) aufgeführten Transportvorgänge?
- (8) Pflanzliche Zellen sind durch die Zellwand miteinander verbunden und statisch gestützt. Wie sind tierische Zellen miteinander verbunden? Wodurch sind sie formstabil?
- (9) Beschriften Sie die Zelle in Abbildung 1.12.
- (10) Bei der Zelle in Abb. 1.12 handelt es sich um eine Drüsenzelle. Was ist die Funktion einer Drüsenzelle? [●]
- (11) Wie hängt der Bau und die Funktion einer Drüsenzelle zusammen?
- (12) Wie ist eine Drüse aufgebaut? [●]

(5) Literaturverzeichnis:

Auflistung aller zur Erstellung des Kapitels verwendeten Literaturquellen.

Literatur

Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierende: Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.

Campbell, N. A., Reece, J. B. & Urry, L. A. (2015). *Biologie* (10., aktualisierte Auflage. Hg. v. Jürgen J. Heinisch und Achim Paululat). München: Pearson.

Heldmaier, G., Neuweiler, G. & Rössler, W. (2013). *Vergleichende Tierphysiologie* (2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage). Heidelberg: Springer Spektrum.

(6) Abbildungsverzeichnis:

Auflistung der im Kapitel einbezogenen Abbildungen sowie ihrer Quellen und Lizenzen.

Alle Abbildungen sind für die Weitergabe im Sinne von ‚open resource‘ zugelassen bzw. sind Vereinbarungen zur Einbindung in diesem Skript mit dem Verlag getroffen.

Abbildungen

Abbildung 2.1: **Menschliches Herz**. Ursprünglicher Bildtitel: Anatomy of the Human Heart; Bild von: Tvanbr; 2010; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_Heart_Latin_Tiesworks.jpg

Abbildung 2.2: **Gastrovaskularsystem**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 2.3: **Offenes Kreislaufsystem bei einer Webspinne**. Ursprünglicher Bildtitel: Innere Anatomie einer Webspinne; Bild von: John Henry Comstock; 2010; Lizenz: CC BY 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spider_internal_anatomy-de.svg

1. Bakterien

Die Welt um uns ist gefüllt mit vielen für uns nicht sichtbaren, winzig kleinen Organismen. Zu ihnen zählen die Bakterien. Bakterien (Singular: Bakterium; wissenschaftlich: *Bacteria*) haben eine Länge von 0,6 µm bis 700 µm und einen Durchmesser zwischen etwa 0,1 µm und 700 µm (1 µm entspricht 10^{-6} m). Bakterien können für den Menschen oder andere Organismen Pathogene sein wie z. B. *Clostridium tetani*, der Erreger des Wundstarrkrampfs Tetanus. Sie können für den Körper hilfreich sein wie z. B. *Escherichia coli*, welches in der Darmflora von Tieren und Menschen lebt und ein Vitaminproduzent ist (Vitamin K). Bakterien können im Körper als Symbionten leben, z. B. Mitochondrien, so wird vermutet, waren ursprünglich Bakterien, ein anderes Beispiel sind die Knöllchenbakterien (*Rhizobiaceae*), die in den Wurzeln von Schmetterlingsblütlern (*Fabacea*) leben und molekularen Stickstoff binden und diesen dadurch für die Pflanzen verfügbar machen. Bakterien können auch bedeutend in der Lebensmittelproduktion sein, so werden zur Joghurtherstellung Milchsäurebakterien (*Lactobacillales*) eingesetzt.

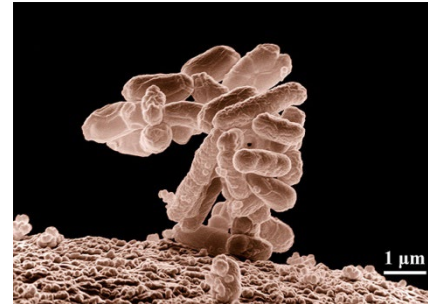


Abb.1.1: Escherichia coli

Bild: Erbe, digitalisiert und coloriert
Christopher Pooley, 2005

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- den Aufbau eines Bakteriums beschreiben,
 - Bakterienzellen von anderen Zellen abgrenzen,
 - die Vermehrungsarten von Bakterien darstellen,
 - die Fortbewegungsarten von Bakterien erklären,
 - den Energiestoffwechsel von Bakterien erläutern.

Sie erhalten Einblick in das System der Bacteria.

1.1 Systematik

Die Bakterien (*Bacteria*) bilden eine der drei Domänen der Lebewesen. Die Domäne ist die höchste Klassifizierungskategorie in der Systematik. Neben den *Bacteria* gibt es noch die zwei weiteren Domänen *Archaea* und *Eucarya* (Woese, Kandler & Wheelis, 1990). Früher wurden die Prokaryoten (*Bacteria* und *Archaea*) als zusammengehörende Gruppe von den Eukaryoten getrennt, da Eukaryoten eine andere Zellmembran, einen Zellkern und Zellorganellen besitzen. Durch die Analyse der ribosomalen RNA (rRNA) wurde jedoch deutlich, dass man nicht eine Zweiteilung (Eukaryoten und Prokaryoten), sondern eine Dreiteilung vornehmen muss. Aus den Prokaryoten entstanden die Domänen *Bacteria* und *Archaea* und die *Eucarya* (Eukaryoten) wurden zu einer hierarchiegleichen Do-

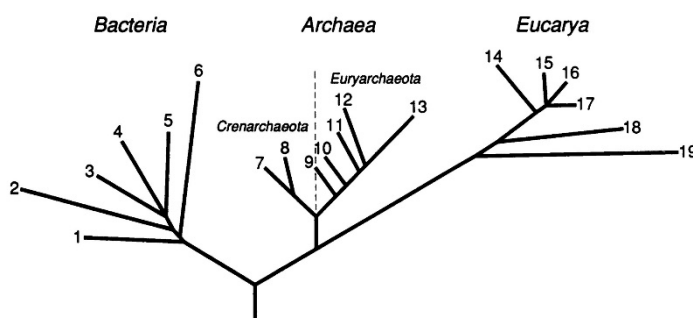


Abb.1.2: Phylogenie der drei Domänen

Bild: Woese et al., 1990. Die Zahlen in der Abbildung verweisen ursprünglich auf die Untergruppen, da diese in der aktuellen Diskussion umstritten sind, wurde die Auflistung nicht übernommen.

mäne. Die drei von Woese, Kandler und Wheelis beschriebenen Domänen sind noch heute in der Systematik akzeptiert. Die damals von Woese, Kandler und Wheelis dargestellten Untergruppen der Domänen sind jedoch nach den neuen Erkenntnissen nicht mehr aktuell.

Die Unterteilung der Bakterien erfolgte durch die Analyse des Gens des ribosomalen Untereinheitsmoleküls „16S“ und führte zum phylogenetischen System der Bakterien von Garrity et al. (2007). Hierbei wird das Gen isoliert (Lyse der Zelle und danach Isolierung des Gens) und sequenziert. Das 16S-rRNA Molekül entspricht von der Funktion her dem 18S-rRNA Molekül bei den Eukaryoten. S ist das Maß der Größe (des Gewichts) eines Makromoleküls.

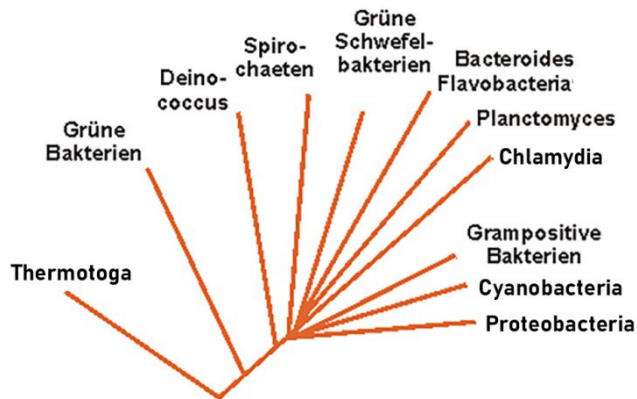


Abb.1.3: Phylogenie der Bacteria

Bild: ohne Namen, 2004, verändert

Die Abbildung zeigt eine vereinfachte Darstellung der Phylogenie der Bacteria. Eine detailliertere Übersicht findet sich bei Madigan, Martinko, Stahl & Clark, 2015, S. 416.

Proteobacteria: Größte Gruppe der Bakterien. Zum Phylum der Proteobacteria gehören beispielsweise die Purpurbakterien. Purpurbakterien gewinnen durch anoxygene Photosynthese Energie, um organisches Material aufzubauen. Bei der anoxygenen Photosynthese entsteht im Vergleich zur oxygenen Photosynthese kein Sauerstoff. Die Pigmente für die Photosynthese sind Bakteriochlorophyll und Carotinoide, die den Purpurbakterien eine rötliche bis rotbraune Färbung verleihen. Purpurbakterien sind gramnegative Bakterien; einige reagieren jedoch gramvariabel.

Cyanobacteria (Cyanobakterien): Charakteristisch ist die – nicht bei allen Arten vorhandene – Fähigkeit zur oxygenen Photosynthese. Die Cyanobakterien wurden früher als Blaualgen unter den Algen geführt.

Grampositive Bakterien: Die grampositiven Bakterien bestehen aus zwei Untergruppen: den *Actinobacteria* (Aktinobakterien) und den *Firmicutes*. Aktinobakterien haben die Form von Stäbchen, Kokken oder eine Coryneform (an einem Ende keulenförmig verdickt). Sie kommen z. T. mehrzellig vor, viele Aktinobakterien können Endosporen (siehe Abb. 1.12) bilden. Die *Firmicutes* unterscheiden sich von den Aktinobakterien durch ihren GC-Gehalt (Anteil der DNA-Basen Guanin und Cytosin).

Chlamydia (Chlamydien): Chlamydien sind sehr kleine Bakterien. Sie können sich nur innerhalb einer Wirtszelle vermehren.

Planctomyces: Zellen der *Planctomyces* sind stark kompartimentiert, sie besitzen häufig etwas Ähnliches wie eine Kernmembran. Die Bakterienzellen sind gestielt. Mit dem Stiel sind sie an festen Oberflächen angeheftet.

Bacteroides, Flavobacteria: Die *Bacteroides* kommen im Darm von Mensch und Tieren vor. Einige Arten können auch Pathogene sein (z. B. Erreger der Blutvergiftung). *Bacteroides* stellen als einzige Sphingolipide her (fettlösliche Substanzen). Flavobacterium-Arten findet man hauptsächlich in aquatischen Lebensräumen. Die Kolonien sind häufig gelb pigmentiert. Manche Arten der Flavobakterien sind pathogen.

Grüne Schwefelbakterien (Chlorobien): Chlorobien betreiben anoxygene Photosynthese (es entsteht kein O_2) und nutzen hierfür reduzierte Schwefelverbindungen wie Schwefelwasserstoff (H_2S) und Thiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) oder elementaren Schwefel (Chlorobien siehe Abb. 1.8).

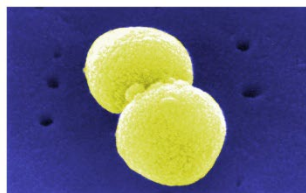
Spirochaeten (Spirochäten): *Spirochaeten* haben, im Gegensatz zu den auch schraubenförmig gebauten Spirillen (gehören zu den *Proteobacteria*), keine starre, durch die Zellwand gegebene Gestalt. Sie besitzen nicht nach außen ragende Geißeln, sondern Endoflagellen, die im Körper sind. Durch Drehung der Flagellen kommt es zur Rotation des Körpers.

Deinococcus: Besitzen Zellwände, die grampositiv sind, jedoch auch eine weitere Zellmembran, die gramnegativ ist.

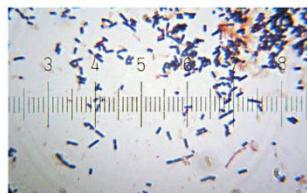
Grüne Bakterien (Grüne Nicht-Schwefel Bakterien): Der Photosyntheseapparat der Grünen Nicht-Schwefel Bakterien besitzt einen ungewöhnlichen Aufbau: Er enthält Pigmente wie Chlorosomen und Bacteriochlorophyll c, welche für Grüne Schwefelbakterien charakteristisch sind, andererseits Bacteriochlorophyll a, das bei Purpurbakterien vorkommt.

Thermotoga: Stäbchenförmige Bakterien, die von einer scheidenartigen Hülle (Toga) umgeben sind. Obligat (unbedingt) anaerobe Bakterien. *Thermotoga* kommen in heißen Quellen und marinen Hydrothermalgebieten vor.

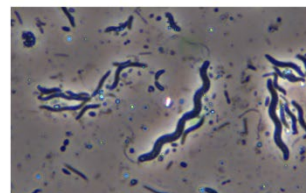
Bakterien werden aus pragmatischen Gründen oft immer noch in Anlehnung an das klassische System nach ihrer Form und ihrer Organisation unterteilt (diese Einteilung entspricht aber keiner wissenschaftlichen Einteilung). Nach dieser pragmatischen Einteilung kann man Kokken, Bazillen und Spirillen unterscheiden. Kokken sind in ihrer Form kugelige Bakterien. Bazillen sind längliche, zylindrische Bakterien. Spirillen haben eine spiralige, wendelförmige Gestalt.



(A) Kokken: Pneumokokken



(B) Bazillen: Lactobacillus



(C) Spirillen aus Schweinejauche

Abb.1.4: Pragmatische Einteilung der Bakterien

(A) Bild von Facklam; (B) Bild von Blaylock; (C) Bild von Adlassnig

1.2 Anatomie von Bakterien

Die Formen und Größen der Bakterien sind je nach Art sehr unterschiedlich. Man kann jedoch in der Bakterienzelle gleiche Zellstrukturen erkennen, von denen jedoch nicht alle bei jeder Bakterienart vorzufinden sind (z. B. Äußere Zellmembran, Gasvesikel, Chlorosom). Nachfolgend werden alle Strukturen beschrieben:

(A) Nucleoid

Der DNA-Moleküldoppelstrang ist bei Bakterien in sich geschlossen (er bildet einen Ring). Die DNA liegt frei im Cytoplasma vor. Dies ist einer der markanten Unterschiede zwischen Bakterien und Eukaryoten. Bei den Eukaryoten ist die DNA im Zellkern eingebettet und durch die Kernmembran eingeschlossen.

(B) Plasmid

Eine Besonderheit von Bakterien und Archaeen sind die Plasmide. Plasmide sind kleinere Ringe eines DNA-Doppelstrangs, die frei im Cytoplasma enthalten sind. Plasmide tragen oft nicht lebenswichtige, aber z. T. hilfreiche Gene. Die Gene der Plasmide werden nicht zu den Bakterienchromosomen gezählt. Sie sind zusätzliche Gene und daher extrachromosomal. Plasmide können zwischen Bakterien ausgetauscht werden (Konjugation; siehe Abb. 1.7) oder von den Bakterien auf Wirtszellen übertragen werden.

(C) Cytoplasma

Die Flüssigkeit/Lösung in der Bakterienzelle heißt wie bei allen Zellen Cytoplasma (Syn.: Cytosol). Sie ist in ihrer Zusammensetzung vom Außenmedium verschieden und macht durch ihre Inhaltsstoffe das Leben der Bakterienzelle möglich. Im Cytoplasma finden sich unterschiedlichste Ionen, Mono-, Di- und Polysaccharide, Aminosäuren sowie Nucleotide (Bausteine von Nucleinsäure).

(D) Cytoplasmamembran

Die Cytoplasmamembran der Bakterien besteht aus einer Phospholipid-Doppelschicht und hierin eingelagerten oder angelagerten Proteinen. Die Membran ist ähnlich der Plasmamembran von Eukaryoten, ein Unterschied sind bei manchen Bakterienarten die Hopanoiden (steife, flache Moleküle als Membranverstärker; sind den Steroiden ähnlich). Die Membran unterscheidet sich zu der der Archaeen, da die Membran der Archaeen z. T. aus einer einfachen Phospholipidschicht aufgebaut ist. Wird die Cytoplasmamembran zerstört, läuft das Cytoplasma aus der Zelle aus (Fachbegriff: Lyse) und die Bakterienzelle stirbt. Die Cytoplasmamembran ist das Organ der selektiven Stoffaufnahme und -abgabe. An oder in der Membran sitzen Proteine, die als Enzyme wirken, z. B. beim Energiestoffwechsel (siehe z. B. Abb. 1.14, 1.15).

(E) Zellwand

Das Cytoplasma der Bakterien enthält eine hohe Konzentration gelöster Stoffe, was zu einem hohen osmotischen Druck führt. Damit die Zelle nicht platzt, wird sie durch die Zellwand stabilisiert. Der Zellinnendruck in einer Bakterienzelle entspricht in etwa dem Reifendruck eines PKWs (2 Atmosphären). Die Zellwand führt zur Gestaltform des Bakteriums. Sie ist aus Peptidoglycanen aufgebaut. Ein Peptidoglycan ist aus Zuckern und Aminosäuren zusammengesetzt. Peptidoglycane findet man nur bei Bakterien.

(F) Äußere Zellmembran

Bei gramnegativen Bakterien ist an der Außenseite der Zellwand noch eine zweite Zellmembran vorhanden. Gramnegative Bakterien heißen so, da sie sich mit der Methode der Gram-Färbung (Syn.: Gramfärbung) nicht färben lassen. Die Gram-Färbung wurde von Hans Christian Gram (1853–1938), einem dänischen Bakteriologen, entwickelt.

(G) Ribosomen

An den Ribosomen findet die Proteinsynthese statt. Der Aufbau der Prokaryoten-Ribosomen unterscheidet sich von dem der Eukaryoten. Die Ribosomen der *Bacteria* und *Archaea* enthalten drei unterschiedlich große rRNA-Moleküle, die der *Eucarya* vier.

(H) Pili

Pili (lateinisch: Haare; Singular: Pilus) sind lange Filamente aus Proteinen. Die Pili sind länger als die Fimbrien. Ein Bakterium besitzt nur einen Pilus oder kann auch viele Pili besitzen (siehe Abb. 1.6). Das

Pilus ermöglicht den Genaustausch zwischen Bakterienzellen (Konjugation; siehe Abbildung 1.7) oder kann zur spezifischen Anhaftung an Wirtszellen genutzt werden.

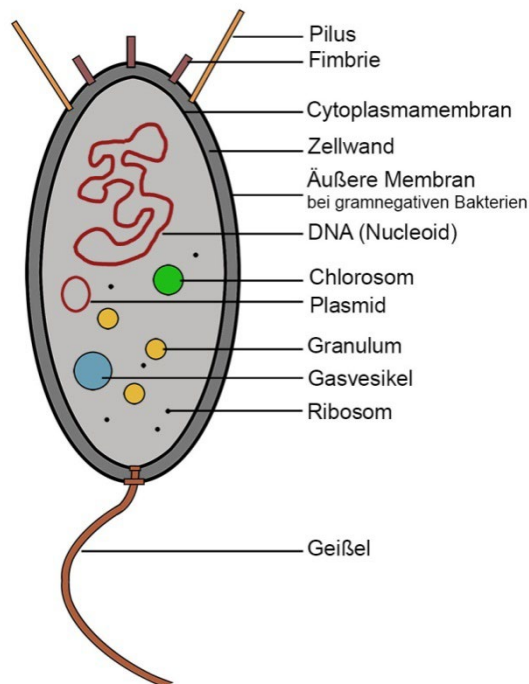


Abb.1.5: Anatomie eines Bakteriums

Bild: Baur, 2019

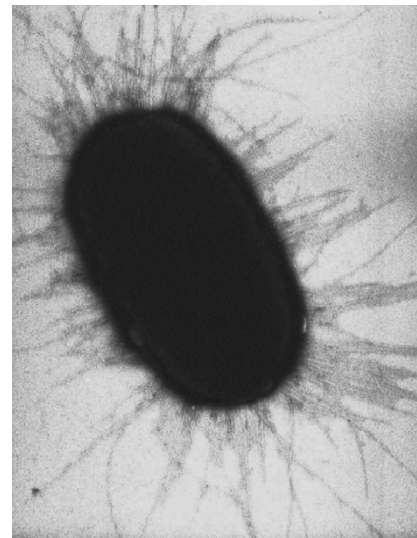


Abb.1.6: Phili bei Escherichia coli

Gramnegatives, säurebildendes und begeißeltes Bakterium. Leben u. a. im menschlichen und tierischen Darm.

Bild: Forero, 2006

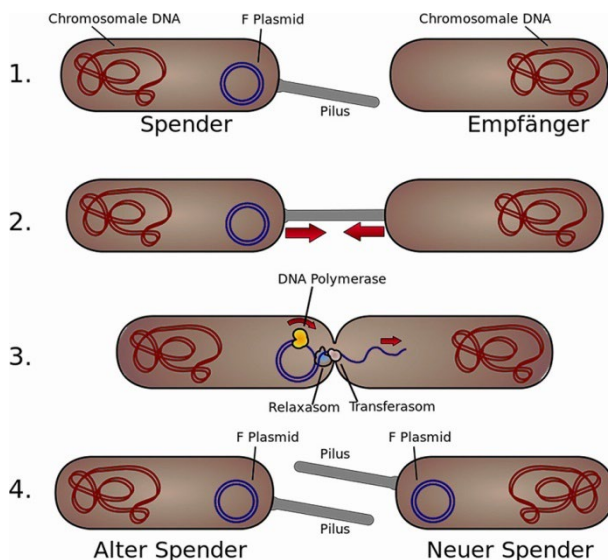


Abb.1.7: Konjugation

Bild: Matthias M., 2012, verändert

Konjugation: Gentransfer durch Kontakt der Zellen. Bei der Konjugation wird die Kopie eines F-Plasmiden in eine Empfängerzelle gebracht (3). Hierfür wird über einen Pilus zuerst der Zellkontakt hergestellt (1 und 2). Nach der Konjugation trennen sich die Zellen wieder (4).

(I) Fimbrien

Fimbrien sind filamentöse Strukturen, die als Anhaftungsorgane eingesetzt werden (Verbindung von Bakterien).

(J) Geißel

Die Geißel (Flagelle) – bzw. bei manchen Bakterien auch mehrere Geißeln – rotiert und zieht oder schiebt so das Bakterium durch ein flüssiges Medium.

(K) Granula

Granula (Singular: Granulum) sind Strukturen, die die Speicherung von Energiereserven oder Baustoffreserven ermöglichen. Die im Granulum enthaltenen Stoffe sind von einer einschichtigen Membran umgeben. Das Bilden von Granula verhindert osmotischen Stress, da durch die Bildung von Granula eine starke Abweichung der Stoffkonzentrationen im Cytoplasma vermieden wird.

(L) Gasvesikel

Bei schwimmenden Bakterien wird Auftrieb durch das Bilden von Gasvesikeln hergestellt. Die Vesikel bestehen aus einer Proteinhülle, in die Gase eingeschlossen werden. Durch die Vesikel kann die Schwebehöhe im Wasser eingestellt werden.

(M) Chlorosomen

Chlorosomen sind Organellen von Photosynthese betreibenden Grünen Schwefelbakterien (*Chlorobien*) und Grünen Bakterien (*Chloroflexi*). Sie sind in ihrem Aufbau rechteckige bis ellipsoide Strukturen, die hauptsächlich Bacteriochlorophylle (c, d oder e) sowie geringere Mengen Carotinoide und Chinone für die Photosynthese enthalten.



Abb.1.8: Grüne Schwefelbakterien (Chlorobien)

Bild von: Mikrobiologisches Praktikum Universität Kassel, 2007

1.3 Fortbewegung

Bakterien sind je nach Art in der Lage, sich frei fortzubewegen und/oder sich an Oberflächen festzusetzen.

Bewegliche Bakterien können sich in einem flüssigem Medium (durch Schwimmen, Schweben) oder auf glatten Oberflächen (durch Gleiten) fortbewegen. Die Fortbewegung im flüssigen Medium überwiegt.

(A) Fortbewegung mithilfe von Geißeln (Flagellen)

Die Geißeln der Bakterien sind starre Gebilde aus dem Protein Flagellin, die durch Drehung bewegt werden. Die Drehung führt zum Ziehen oder Schieben durch das Wasser. Geißeln können um die ganze Zelle herum (peritrich) angeordnet sein oder an den Polen der Zelle (polar). Die Geißelrotation (mit einem Flugzeugpropeller zu vergleichen) erfolgt durch das Einströmen von H^+ -Protonen. Die Protonen strömen hierbei durch Mot-Proteine (spezifische Kanäle) ins Zellinnere. Da der MS- und C-Ring Ladungen tragen, kommt es durch die gegensätzlichen Ladungen zur Anziehung und durch gleiche Ladungen zur Abstoßung, was insgesamt zur Rotation der verbundenen MS- und C-Ringe führt (vgl. Abb. 1.9). Die Geißel ist fest mit dem MS- und C-Ring verbunden. Für die Drehbewegung muss immer wieder ein Protonengradient aufgebaut werden.

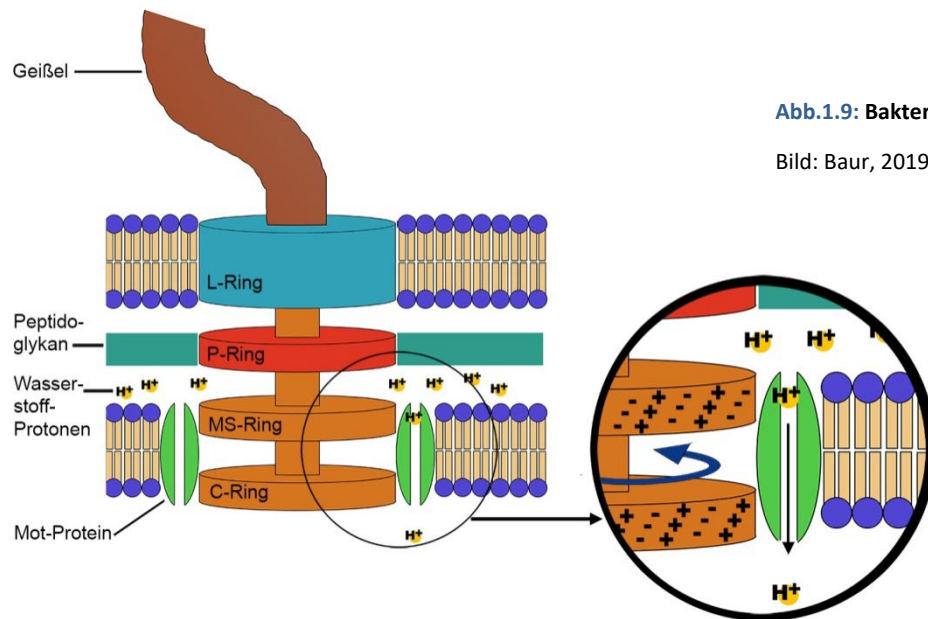


Abb.1.9: Bakteriengeißel

Bild: Baur, 2019

(B) Schraubenbewegung

Spirochaeten können sich durch Drehung um ihre Körperachse fortbewegen. Da sie spiralförmig gebaut sind, arbeiten sie sich dadurch durch das flüssige Medium.

(C) Schweben mithilfe von Gasvakuolen

Durch den Aufbau und den Abbau von Gasvakuolen kann die Schwebehöhe im Wasser eingestellt werden.

(D) Gleiten

Einige Bakterienarten können auf Oberflächen gleiten. Man vermutet, dass Cyanobakterien einen Schleim bilden, der sie voranschleibt. Bei anderen Bakterien (z. B. *Flavobacterium johnsoniae*) vermutet man, dass Proteine der Zellmembran, die an der Oberfläche ansetzen, in der Zellmembran verschoben werden, was zur Fortbewegung führt.

1.4 Vermehrung und Sporenbildung

Die Vermehrung von Bakterien durch Zellteilung wird auch als ‚bakterielles Wachstum‘ bezeichnet. Beim ‚bakteriellen Wachstum‘ wird die Bakterienanzahl als die anwachsende Größe gesehen. In dieser Arbeit wird der Begriff Wachstum jedoch im Zusammenhang mit der Zunahme der Zellgröße verwendet.

Die Vermehrung von Bakterien kann durch Zellteilung oder bei einigen Arten durch Knospung erfolgen.

Bei der **Zellteilung** entstehen aus einem Bakterium durch Bildung eines Septums (Trennwand) zwei Bakterien. Das Septum bildet sich in der Symmetrieebene zur Bakterienlänge. Der Aufbau des Septums erfolgt von der bestehenden Zellmembran ausgehend nach innen hin. Zuvor haben ein Längenwachstum und eine Verdopplung der DNA stattgefunden. Bei der Zellteilung sind beide entstehenden Zellen gleich groß, jedoch kleiner als die ursprüngliche Bakterienzelle.

Bei der **Knospung** wächst aus einem Mutterorganismus ein Spross (eine Knospe) hervor, der sich nach einer gewissen Zeit vom Mutterorganismus abtrennt. Spross und Mutterorganismus unterscheiden sich in ihrer Größe. Knospung gibt es nicht nur bei Bakterien, sondern auch bei anderen Organismen (z. B. Nesseltiere *Cnidaria*).

Bei beiden Arten der Vermehrung spricht man von einem **vertikalen Gentransfer**. Bei der Konjugation liegt ein **horizontaler Gentransfer** vor (vergleiche Abb. 1.7).

Bei wenigen Arten kann durch die Bildung von mehreren **Sporen** eine Vermehrung stattfinden. Bei den meisten Bakterienarten wird jedoch nur eine Spore gebildet. Daher ist das Bilden von Sporen keine Vermehrung im eigentlichen Sinn. Die Sporenbildung tritt meist bei einem Mangel an Nährstoffen ein. Die Bildung von Sporen (Ruhezustand einer Bakterienzelle) ermöglicht die Erhaltung der Gene. So können Sporen Tausende von Jahren überleben. Die Spore ist resistent gegenüber Kälte, Hitze, Säure und UV-Strahlung. Hitzeresistenz entsteht vermutlich durch gebildete Dipicolinsäuren (Abb. 1.9) und Ca^{2+} . Die Hitzeresistenz von Sporen korreliert mit der enthaltenen Menge an Ca^{2+} und Dipicolinsäure (Mallidis & Scholefield, 1987). Die Resistenz gegenüber UV-Strahlung wird durch gebildete SASPs gewährleistet. Die SASPs (Proteine) binden an die DNA und schützen diese dadurch vor der Strahlung. Für die Resistenzen tragen auch der niedrige Wassergehalt in der Spore und die besondere Zellwand das Ihrige bei. Im Sporenstadium finden kein Größenwachstum und kein Stoffwechsel statt. Man kann zwischen Endo-, Exosporen und Cysten unterscheiden. Endosporen werden von unterschiedlichen Arten grampositiver Bakterien gebildet. Sie entstehen durch asymmetrische Teilung und einer späteren Sporenreifung in der Bakterienzelle. Exosporen entstehen durch Knospung und Umbildung der entstehenden Tochter-Bakterienzelle. Bei der Cystenbildung wird die komplette Bakterienzelle zu einer Spore umgebildet.

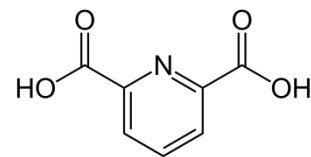


Abb.1.10: Dipicolinsäure



Beispiel zur Endosporenbildung:

Amerikanische Faulbrut (Bakterium *Paenibacillus larvae*), ein Schädling der Honigbiene

Abb. 1.11: Bild: Tanarus: Positiver Faulbruttest. Mit dem Streichholz wird ein schleimiger Faden herausgezogen.

Die Infektion der Amerikanischen Faulbrut – Infektion mit dem Bakterium – erfolgt über das Futter der Honigbienenmade (Larve der Biene). Die Sporen des Bakteriums keimen im Darm der Bienenmade zu Stäbchen, die entwickelten aktiven Bakterien ernähren sich vom Bienenfutter. Sobald die Stäbchen durch ihre extreme Zellteilung den Darm restlos gefüllt haben, brechen sie durch den Darm. Die Bienenmade stirbt dadurch. Nun kommt es beim Bakterium aufgrund des Nährstoffmangels zur Bildung von Sporen. Stirbt die Bienenmade erst nach der Verdeckelung, kommt es in der Zelle zur Bildung von einer zähen Masse, die hoch infektiös ist. Die Putzbienen haben Schwierigkeiten, die mit Sporen besetzte Masse zu entfernen. Über den Putztrieb werden die Sporen im Volk verteilt und gelangen auch in die Futtervorräte. Die Folgen für das betroffene Bienenvolk sind fatal.

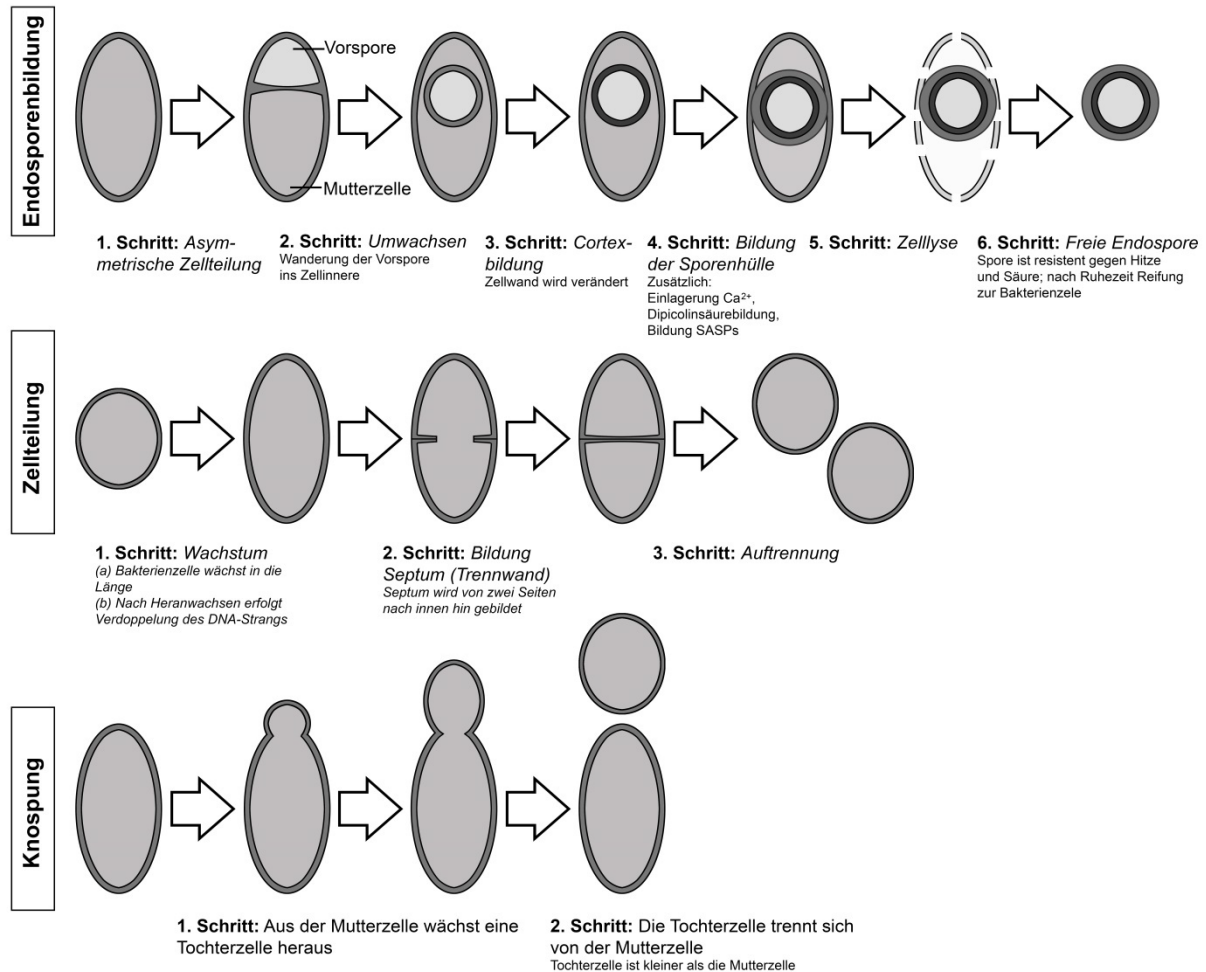


Abb.1.12: Vergleich: Endosporenbildung, Zellteilung, Knospung

Bild: Baur, 2019

1.5 Ernährung und Energiestoffwechsel

Die Vielfalt der Bakterien spiegelt sich auch in Unterschieden im Energiestoffwechsel wider. Man kann die Bakterien danach unterteilen, wie sie Energie und Kohlenstoff beschaffen sowie welche Reduktionsmittel sie einsetzen, um organische Moleküle aufzubauen.

(A) Gewinnung von Energie

Man kann hierbei zwischen **phototroph** und **chemotroph** unterscheiden. Stammt die Energie vom Licht, spricht man von phototroph. Stammt die Energie aus chemischen Verbindungen, spricht man hingegen von chemotroph.

(B) Beschaffung von Kohlenstoff

Man kann bei phototrophen und chemotrophen Organismen zwischen **autotroph** und **heterotroph** unterscheiden. Autotrophe Organismen können anorganische Verbindungen wie z. B. CO_2 als Kohlenstoffquelle nutzen. Heterotrophe Organismen benötigen organische Verbindungen als Kohlenstoffquellen.

Tabelle 1.1: Ernährungsformen in Bezug auf Energie- und Kohlenstoffquellen

Energie- quelle	Kohlenstoffquelle		
		anorganische Verbindungen	organische Verbindungen
	Licht	photoautotroph	photoheterotroph
	chemische Verbindungen	chemoautotroph	chemoheterotroph

(C) Art der Reduktionsmittel

Als weiteres kann man zwischen **lithotrophen** und **organotrophen** Organismen unterscheiden. Lithotrophe Organismen verwenden ausschließlich anorganische Reduktionsmittel für ihren Baustoff- und Energiestoffwechsel. Organotrophe Organismen verwenden auch organische Reduktionsmittel wie NAD^+/NADH , $\text{NADP}^+/\text{NADPH}$, FAD/FADH_2 .

Bei der Zellatmung (Stoffwechsel zur Energiegewinnung) spielt noch die Abhängigkeit von Sauerstoff eine Rolle, was zur vierten Unterscheidung führt:

(D) Art der Zellatmung

Man kann bei der Zellatmung zwischen **anaeroben** und **aeroben** Organismen unterscheiden. Anaerobe Organismen verwenden keinen (obligatorische Anaerobier) oder nicht immer (fakultative Anaerobier) Sauerstoff für die Zellatmung, wohingegen aerobe Organismen Sauerstoff (O_2) benötigen. Der Sauerstoff wird bei der Zellatmung dafür benötigt, um am Ende der Redoxreaktionen (Atmungskette), bei denen H^+ -Protonen aus der Zelle gepumpt werden (Aufbau eines Gradienten für ATP-Synthese), die Elektronen aufzunehmen (letzte Oxidation). Wird kein Sauerstoff verwendet (anaerobe Atmung), wird ein anderer Elektronenakzeptor (elektronenaufnehmender Akteur) benötigt, dies kann ein anorganisches oder organisches Molekül sein. Ein Elektronenakzeptor wird benötigt, damit die Reduktionsmittel, z. B. NAD^+ , wieder verfügbar sind.

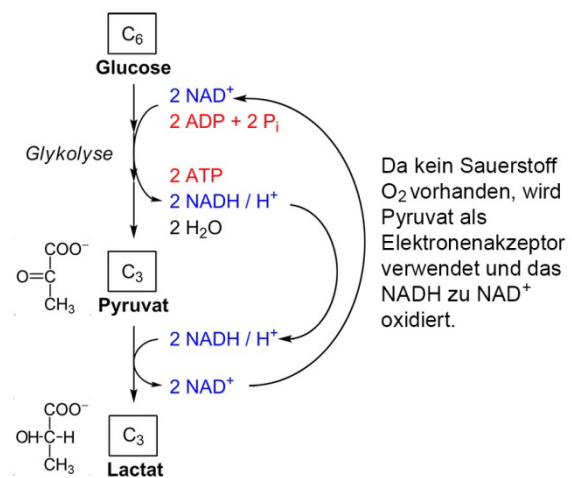


Abb.1.13: Milchsäuregärung

Man kann bei den Bakterien vier Haupternährungstypen vorfinden (Campbell, 2015):

- (I) **Photolithoautotroph:** Aufbau der organischen Moleküle mithilfe der Photosynthese. Die Energie stammt aus dem Licht (Sonne) und der Kohlenstoff aus CO_2 oder anderen anorganischen Verbindungen (z. B. Bicarbonat: HCO_3^-). Photolithoautotrophe Bakterien sind die Cyanobakterien (Blaualgen).
- (II) **Chemolithoautotroph:** Organische Moleküle werden mit Energie aus der Oxidation von reduzierten anorganischen Verbindungen (z. B. Schwefelwasserstoff: H_2S ; Ammoniak: NH_3 ; Eisen Fe^{2+}), und dem Kohlenstoff, gewonnen aus CO_2 , aufgebaut.

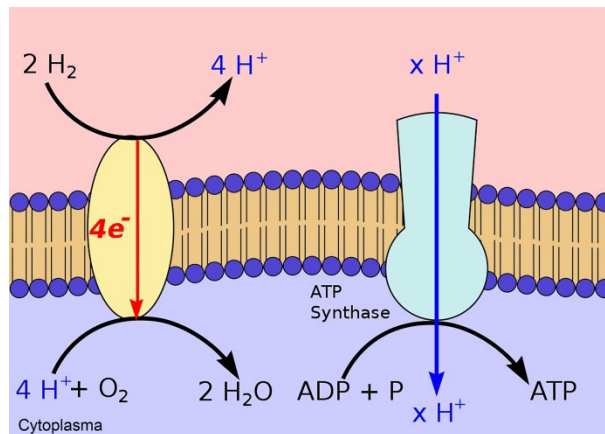


Abb.1.14: Beispiel der Energiegewinnung bei Chemolithoautotrophie

ATP-Bildung durch Oxidation von H_2 bei *Aquifex aeolicus*. Durch die Oxidation von H_2 entstehen vier H^+ -Protonen und vier Elektronen. Die Elektronen werden vom Enzymkomplex zur Reduktion von O_2 eingesetzt. Der reduzierte Sauerstoff verbindet sich mit H^+ zu H_2O . Die im Zellaußenraum entstandenen H^+ -Protonen strömen durch die ATP-Synthase, hierbei entsteht ATP.

Bild: ohne Namen, 2015, verändert

- (III) **Photoheterotroph:** Aufbau der organischen Moleküle mithilfe der Photosynthese. Die Energie stammt aus dem Licht (Sonne). Photoheterotrophe Organismen müssen Kohlenstoff in organischer Form aufnehmen. Die Reduktionsmittel können hierbei ausschließlich anorganisch (lithotrop) oder auch organisch (organotroph) sein.
- (IV) **Chemoheterotroph:** Die Energie wird komplett durch die Oxidation organischer Verbindungen gewonnen. Kohlenstoff für den Baustoffwechsel muss über organische Verbindungen aufgenommen werden. Chemoheterotrophe Organismen sind organotroph. Dieser Ernährungstyp ist weit verbreitet.

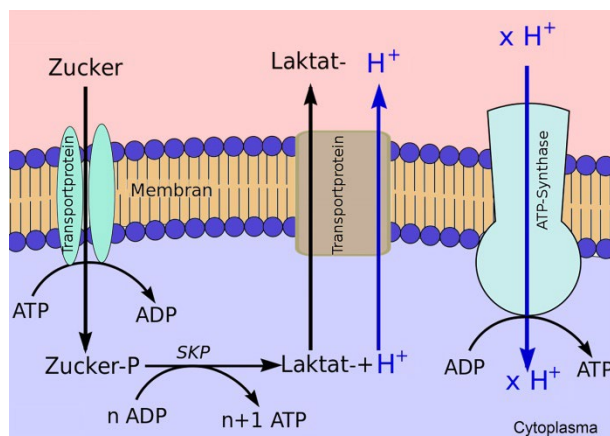


Abb.1.15: Beispiel der Energiegewinnung bei Chemoheterotrophie

ATP-Generierung beim Milchsäurebakterium: Kohlenhydrat wird aktiv ins Zellinnere aufgenommen und zu Milchsäure (Laktat + H^+) reduziert. Hierbei entsteht je nach Kohlenhydrat eine gewisse Anzahl von ATP. Die entstehende Milchsäure (Laktat + H^+) wird energieneutral aus der Zelle transportiert. Durch das H^+ entsteht ein Gradient, durch den ein ATP erzeugt werden kann.

Bild: ohne Namen, 2015, verändert



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

aerob	Eukaryoten	Kokken
anaerob	extrachromosomal	Konjugation
Archaea	Flagelle	Pathogen
autotroph	Geißel	phototroph
Bazillen	Gradient	Plasmid
chemotroph	gramnegativ	Prokaryoten
Domäne	grampositiv	Spirillen
Eucarya	heterotroph	

Aufgabe 2:

- (1) Worin unterscheiden sich Bakterien, Archaeen und Eukaryoten?
- (2) Zeichnen Sie ein Bild eines Bakteriums und beschriften Sie die Zellbestandteile.
- (3) Wie können sich Bakterien fortbewegen?
- (4) Wie funktioniert der Geißelschlag bei Bakterien?
- (5) Welche Arten der Vermehrung gibt es bei Bakterien?
- (6) Worin unterscheidet sich Fortpflanzung von Vermehrung? [●]
- (7) Erklären Sie die Sporenbildung.
- (8) Worin unterscheidet sich die Bildung von Endo-, Exosporen und Cysten.
- (9) Welche Haupternährungstypen kann man bei Bakterien finden?

Literatur

- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Urry, L. A. (2015). *Biologie* (10., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Garrity, G., Cole, J., Lilburn, T., Harrison, S., Euzéby, J. & Tindall, B. (2007). *Taxonomic Outline of the Bacteria and Archaea*. East Lansing, Michigan: Michigan State University.
- Gottschalk, G. (2015). *Welt der Bakterien, Archaeen und Viren: Ein einführendes Lehrbuch der Mikrobiologie*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Mallidis, C. G. & Scholefield, J. (1987). Relation of the heat resistance of bacterial spores to chemical composition and structure I: Relation to core components. *Journal of Applied Bacteriology*, 62(1), 65–69.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Stahl, D. A. & Clark, D. P. (2015). *Brock Mikrobiologie kompakt* (Pearson Studium, 13., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Ritter, W. (2016). *Bienen gesund erhalten: Krankheiten vorbeugen, erkennen und behandeln* (2., überarbeitete und erweiterte Auflage). Stuttgart: Ulmer.
- Sadava, D. E., Hillis, D. M., Heller, H. C. & Berenbaum, M. (2011). *Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Woese, C. R., Kandler, O. & Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(12), 4576–4579.

Abbildungen

Abbildung 1.1: **Escherichia coli**. Ursprünglicher Bildtitel: E coli at 10000x; Bild von: Eric Erbe, digital colorization by Christopher Pooley, Agricultural Research Service, the research agency of the United States Department of Agriculture; 2005; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:E_coli_at_10000x,_original.jpg

Abbildung 1.2: **Phylogenie der drei Domänen**. Ursprünglicher Bildtitel: Universal phylogenetic tree in rooted form, showing the three domains. Bild aus: Woese, C. R., Kandler, O. & Wheelis, M. L. (1990), S. 4578.

Abbildung 1.3: **Phylogenie der Bacteria**. Ursprünglicher Bildtitel: phylogeny of bacteria; Bild von: Kookaburra (Benutzer von Wikipedia); 2004; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stammbaum_Bakterien.png. Bild vom Autor verändert

Abbildung 1.4: **Pragmatische Einteilung der Bakterien**. Zusammengesetztes Bild aus den Bildern (1) Pneumokokken von Dr. Richard Facklam; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pneumokokken.jpg>; (2) Lactobacillus acidophilus from a commercially-sold nutritional supplement tablet von Bob Blaylock; 2010; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20101212_200110_LactobacillusAcidophilus.jpg?uselang=de; (3) Spirillum von Wolfram Adlassnig; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spirillen.jpg>

Abbildung 1.5: **Anatomie eines Bakteriums**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 1.6: **Phili bei Escherichia coli**. Ursprünglicher Bildtitel: *E. coli* Fimbrien; Bild von: Manu Forero; 2006; Lizenz: CC BY 2.5; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:E_coli_fimbriae.png

Abbildung 1.7: **Konjugation**. Ursprünglicher Bildtitel: Austausch des F-Plasmids durch Konjugation; Bild von: Matthias M.; 2012; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Konjugation_\(Biologie\)#/media/File:Konjugation.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Konjugation_(Biologie)#/media/File:Konjugation.svg); Bild vom Autor verändert.

Abbildung 1.8: **Grüne Schwefelbakterien (Chlorobien)**. Ursprünglicher Bildtitel: Grüne Schwefelbakterien in einer Winogradsky-Säule; Bild von: unbekannt; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Grüne_Schwefelbakterien#/media/File:Green_d_winogradsky.jpg

Abbildung 1.9: **Bakteriengeißel**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 1.10: **Dipicolinsäure**. Ursprünglicher Bildtitel: 2,6-Pyridine Dicarboxylic Acid V; Bild von: unbekannt; 2010; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2,6-Pyridine_Dicarboxylic_Acid_V.2.svg

Abbildung 1.11: **Positiver Faulbruttest**. Ursprünglicher Bildtitel: positive Streichholzprobe; Bild von: Tanarus; o. J.; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paenibacillus_larvae.jpg

Abbildung 1.12: **Vergleich: Endosporenbildung, Zellteilung, Knospung**. Bild von: Armin Baur.

Abbildung 1.13: **Milchsäuregärung**. Ursprünglicher Bildtitel: Die homofermentative Milchsäuregärung als Übersichtsschema; Bild von: Yikrazuul; 2009; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homofermentative_Milchsäuregärung.png; Bild vom Autor stark verändert.

Abbildung 1.14: **Beispiel der Energiegewinnung bei Chemolithoautotrophie**. Ursprünglicher Bildtitel: Mitchell-simple2a; Bild von: unbekannt; 2015; Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mitchell-simple2a.svg>; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 1.15: **Beispiel der Energiegewinnung bei Chemoheterotrophie**. Ursprünglicher Bildtitel: Laktobazillen.svg; Bild von: unbekannt; 2015; Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laktobazillen.svg>; Bild vom Autor verändert.

2. Protozoen

Die Vertreter der eukaryotischen Einzeller, die keine Chloroplasten besitzen, werden als Protozoen bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen einer tierischen und pflanzlichen Lebensweise ist nicht immer eindeutig möglich, sodass unter den Protozoen auch Organismen mit Chloroplasten zu finden sind, die zusätzlich tierische Ernährungsformen (Heterotrophie) aufweisen. Beispiele hierfür sind die Euglenen. Der deutsche Begriff für Protozoa ist Ur-tierchen, was ihre Stellung in der Evolution ausdrücken soll. Protozoen finden sich – sessil oder freischwimmend – überall, wo ein gewisses Maß an Feuchtigkeit vorhanden ist: im Süßwasser, im Salzwasser, im Boden, an Pflanzen, in zersetztem organischem Material, auf oder in Tieren.



Abb.2.1: Lidtierchen
Blepharisma japonicum
Bild: Frank Fox, 2012

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- Protozoen von anderen Einzellern abgrenzen,
 - die Arten der Ernährung von Protozoen beschreiben,
 - die Fortbewegungsformen von Protozoen aufführen und erklären,
 - die Vermehrungsweisen von Protozoen aufzählen und erklären.

Sie erhalten einen Einblick in die systematische Eingruppierung der Protozoa.

2.1 Systematik

Protozoen (Protozoa) gehörten ursprünglich im klassischen System der fünf Reiche von Whittaker (aus dem Jahre 1969) dem Stamm der Protisten (Protista) an. Neue Erkenntnisse belegen, dass dieses System so nicht stimmig ist. In neueren Ergebnissen werden die Protozoen zu unterschiedlichen (nicht monophyletischen) Taxa zugeordnet und bilden keine eigene systematische Gruppe. Alle lebenden Organismen lassen sich drei Domänen zuordnen (System der drei Domänen nach Woese, Kandler & Wheelis, 1990). Die Domäne Eukarya wird in fünf Supergruppen aufgeteilt (Abb. 2.2). Es wird diskutiert, diese Supergruppen weiteren Übergruppen zuzuordnen (vgl. Adl et al., 2012). Vertreter der Protozoen finden sich in den Supergruppen:

- **Opisthokonta:** Zu dieser Supergruppe, zu der auch die Tiere (Metazoa) und Pilze zählen, gehören beispielsweise die Kragengeißeltierchen (Choanomonada; siehe 2.5.A).
- **Amoebozoa:** Die Amoebozoa zeichnen sich durch ihre amöbide Gestalt aus. Amoebozoen sind Einzeller, die keine starre Zellform haben und sich durch die Veränderung der Zellform fortbewegen.
- **Excavata:** Die Gruppe enthält ausschließlich begeißelte einzellige Organismen. In der Gruppe gibt es auch Arten, die Chloroplasten besitzen. Zu dieser Supergruppe zählen beispielsweise die Augentierchen (Euglena).
- **SAR:** Diese Gruppe enthält u. a. die Braunalgen und die Dinoflagellaten.

Die einzige Supergruppe, die keine Protozoen beinhaltet, sind die Archaeplastida. Archaeplastiden sind Pflanzen sowie einzellige und vielzellige Algen. Kennzeichnend für die Archaeplastida ist ihre ausschließliche Energiegewinnung mithilfe der Photosynthese.

Früher hat man die Protozoen in vier Gruppen unterteilt: Flagellaten (Geißeltierchen), Ciliaten (Wimperntierchen), Amöben und Sporozoen (eine parasitäre Gruppe ohne Struktur zur Lokomotion). Diese Einteilung ist in der Wissenschaft nicht mehr geläufig, wird in der Literatur aber noch gelegentlich verwendet.

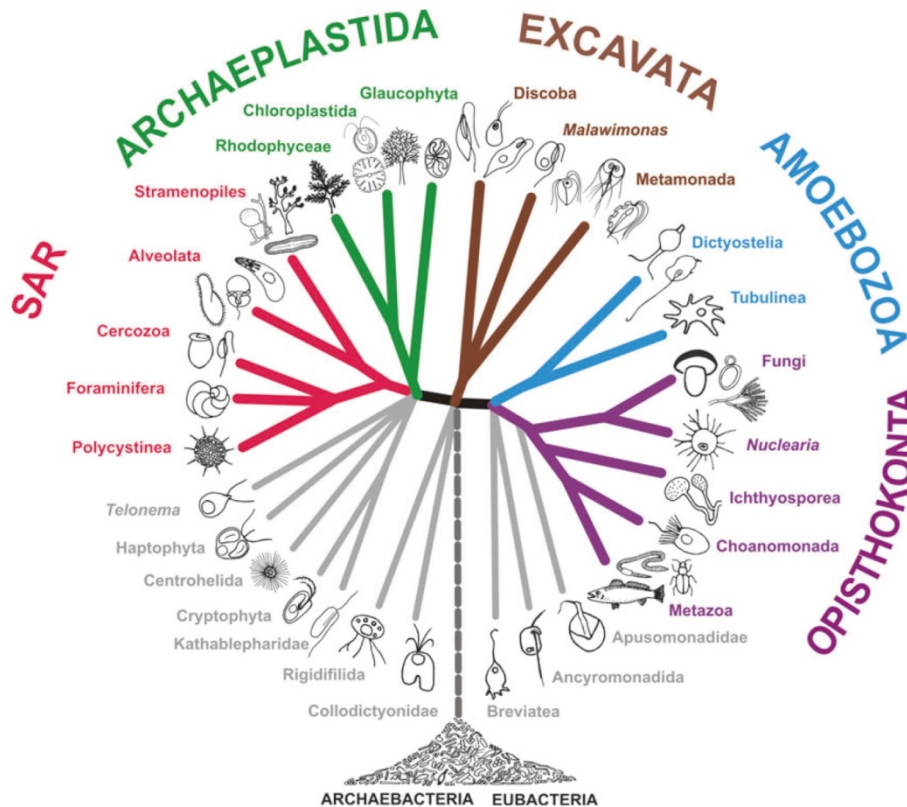


Abb.2.2: Supergruppen der Eukarya
Bild: Adl et al., 2012

2.2 Ernährungsformen

Organismen können sich **autotroph** (organische Stoffe werden aus anorganischen synthetisiert) oder **heterotroph** (organische Stoffe werden aufgenommen) ernähren. Die Organismen, die zu tierischen Organismen gezählt werden, sind typischerweise heterotroph und dadurch auf die Aufnahme (das Fressen) von organischer Nahrung angewiesen. Die Abgrenzung von heterotroph und autotroph ist bei Vielzellern relativ einfach, bei Einzellern z. T. aber nicht möglich, da manche Einzeller beide Formen einsetzen (**mixotroph**).

Die Heterotrophie kann man in **osmotroph** (Synonym: **saprozoisch**) und **phagotroph** (Synonym: **holozoisch**) unterteilen. Osmotrophe Organismen (meist sind dies Pilze und Bakterien) nehmen ausschließlich gelöste Nahrungspartikel auf.

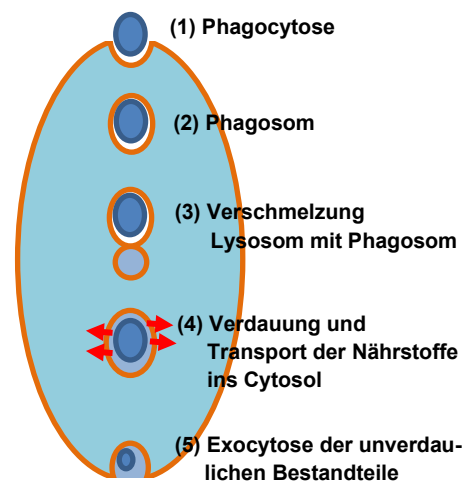


Abb.2.3: Phagocytose und Verdauung

Protozoen ernähren sich meist über Phagocytose (phagotroph, holozoisch). Bei der Phagocytose wird ein Nahrungsteilchen durch Einstülpung der Plasmamembran und folgende Verschließung und Abschnürung der Plasmamembran ins Cytoplasma aufgenommen. Die so gebildete Nahrungsvakuole

(Phagosom) verschmilzt mit einem Lysosom, das entstehende Gebilde heißt Phagolysosom. Durch die Enzyme, die im Lysosom enthalten waren, beginnt die Verdauung des Nahrungsteilchens im Phagolysosom. Nährstoffe werden über die Membran des Vesikels durch Transportvorgänge aus dem Phagolysosom ins Cytoplasma befördert. Unverdauliches im Phagolysosom wird über Exocytose ausgeschieden.

Die Phagocytose kann je nach Protozoenart entweder an einer bestimmten Zellestelle (Zellmund: **Cytostom**) oder an allen beliebigen Stellen der Plasmamembran erfolgen.

Phagocytose kann in ihrer ausgeübten Form sehr unterschiedlich stattfinden: Amöben umfließen (siehe auch Fortbewegung Pseudopodien) ihre Beute und phagocitieren sie dadurch. Nasentierchen (*Didinium*) ziehen ihre Beute (*Paramecium*: Pantoffeltierchen) in ein temporäres Cytostom (siehe Abb. 2.4). Sauginfusorien (Suctoria) fangen ihre Beute mit feinen Tentakeln und saugen deren Cytoplasma über diese aus (siehe Abb. 2.5). Hierbei entstehen viele kleine Nahrungsvakuolen. Kragengeißeltierchen (*Choanomonada*) erzeugen mit ihrer Flagelle eine Wasserströmung, durch die Partikel an einen Saum aus Mikrovilli gestrudelt und über Phagocytose aufgenommen werden (siehe Abb. 2.6, Abschnitt 2.5.A).

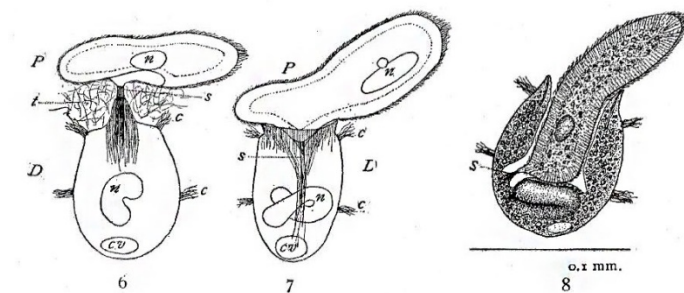


Abb.2.4: Nasentierchen frisst Pantoffeltierchen

Bild: S. O. Mast, 1909

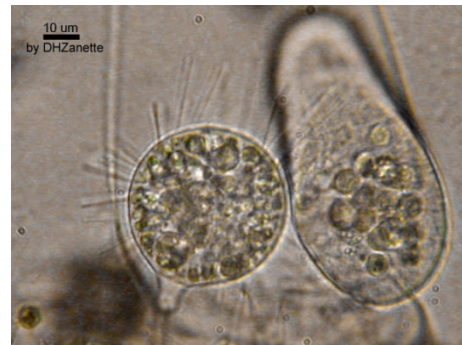


Abb.2.5: Sauginfusor fängt Beute

Bild: Damián H. Zanette, 2008

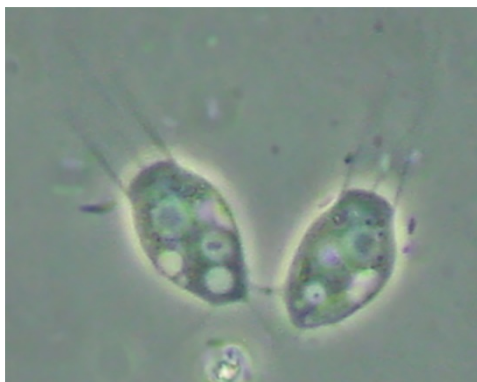


Abb.2.6: Kragengeißeltierchen

Bild: Daniel Stoupin, 2008

2.3 Fortbewegung

(A) Cilien und Flagellen

Eine Cilie oder eine Flagelle (im Weiteren zusammenfassend Geißel genannt) ist innerhalb der Eukaryoten ähnlich aufgebaut. Sie bestehen aus neun Mikrotubulifilament-Paaren, die kreisförmig um zwei Mikrotubulifilamente angeordnet sind (Abb. 2.7 und 2.8). Die Gesamtheit der angeordneten Mikrotubulifilamente nennt man Axonem. Das Axonem ist von der Plasmamembran überzogen. Beim

Übergang in den Zellkörper mündet das Axonem in eine Platte, die an einem Basalkörperchen (Teil des Cytoskeletts) befestigt ist.

Die Formänderung einer Geißel, die zur Bewegung der Geißel führt, ereignet sich durch das Verschieben von Mikrotubulifilamenten (Filamenten aus den kreisförmig angeordneten Mikrotubulis). Der Vorgang wird als Gleitmikrotubuli Hypothese bezeichnet. Die Verschiebung erfolgt durch das am A-Tubulus des Mikrotubulifilamentpaares eingebundene Dynein. Das Dynein bindet sich mit seinen Armen an den B-Tubulus des benachbarten Mikrotubulifilamentpaares. Wie beim Myosin (vgl. Gleitfilamenttheorie) erfolgt bei der Aufspaltung von ATP zu ADP und P_i eine Formänderung der Arme, was das Verschieben der Mikrotubuli zur Folge hat. Die Formänderungen der Geißeln sind typspezifisch. Es können (in einer Ebene fortlaufende) Wellen, Kreisbewegungen oder Geißelschläge entstehen. Krümmt sich beim Geißelschlag die Geißel, um das Medium zu unterwandern, um beim Rückschlag das Medium oder den Organismus zu bewegen, nennt man die Geißeln Cilien. Cilien sind meist auch kleiner und in einer großen Anzahl vorhanden.

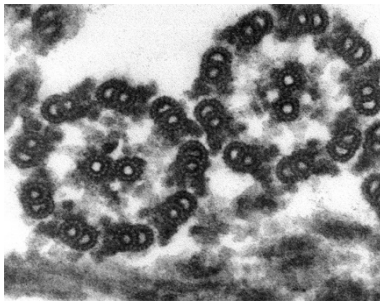


Abb.2.7: Flagelle Querschnitt

Bild: Dartmouth Electron Microscope Facility; Dartmouth College, 2007

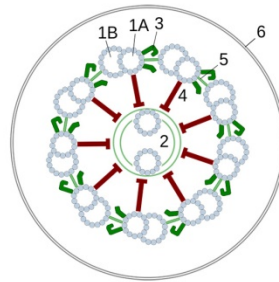


Abb.2.8: Flagelle Querschnitt Schema

Bild: Alexei Kouprianov, 2006

1A + 1B – Doppelmikrotubuli an der Peripherie, 2 – zwei einfache Mikrotubuli in der Mitte, 3 – Dyneinarme, 4 – Speichen, 5 – Nexin-Verbindungen, 6 – Zellmembran

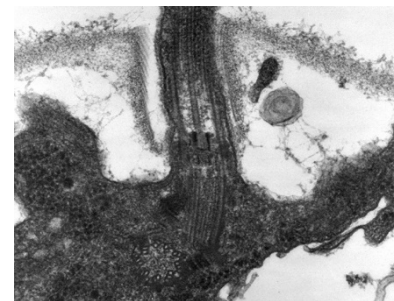


Abb.2.9: Flagelle Längsschnitt

Bild: Dartmouth Electron Microscope Facility; Dartmouth College, 2007

(B) Pseudopodien

Pseudopodien (Scheinfüßchen) sind Ausstülpungen des Cytoplasmas. Für die Bildung der Ausstülpungen werden die unterschiedliche Viskosität des Cytoplasmas, Aktin- und Myosinfilamente genutzt. Das Cytoplasma ist nicht homogen, es kann in zwei verschiedene Lösungen unterteilt werden: das dünnflüssige Endoplasma (im Inneren der Zelle) und das dickflüssige Ektoplasma (in den Außenbereichen der Zelle). Das Endoplasma wird auch als Sol und das Ektoplasma als Gel bezeichnet. In der Grenzschicht befinden sich Aktin- und Myosinfilamente, die durch ihre Bindung und Verschiebung zu einer Steifheit (ähnlich wie bei Muskelkontraktion) beitragen.

Steigt der Calciumgehalt in einem Bereich der Zelle, wird Gelsolin frei, das die Aktinfilamente in diesem Bereich zerlegt. Dies hat zur Folge, dass sich an dieser Stelle die Viskosität des Ektoplasmas sowie die Stützstruktur verändert und Endoplasma in den Bereich durch bleibende Kontraktion (durch die Aktin- und Myosinfilamente) aus dem Inneren der Zelle einströmt.

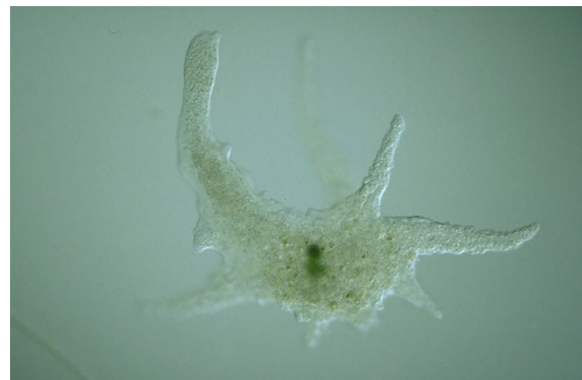


Abb.2.10: Ausstülpung von Parapodien

Chaos carolinense

Bild: Tsukii Yuuji, o. J.

Die Form der Pseudopodien unterscheidet sich. Man kann folgende Typen voneinander abgrenzen:

- **Limaxform:** Ausstülpung des gesamten Körpers durch pseudopodiale Bewegung.
- **Lobopodien:** Ausstülpung von großen Pseudopodien.
- **Filopodien:** Dünne Ausstülpungen, die nur Ektoplasma enthalten.
- **Axopodien:** Dünne Pseudopodien, die durch axiale Mikrotubulistäbe gestützt werden. Ein Axopodium kann durch Addition von Tubulinfilamenten verlängert und durch Abspaltung verkürzt werden. Die Spitzen der Axopodien verankern sich im Substrat. Die Fortbewegung erfolgt durch eine entstehende Rollbewegung.

2.4 Fortpflanzung und Vermehrung

Alle Protozoen können sich ungeschlechtlich vermehren, manche aber auch zudem noch geschlechtlich. Einige der Protozoen sind haploid, andere diploid und manche durchlaufen einen Generationswechsel.

(A) Ungeschlechtliche Vermehrung

Die ungeschlechtliche Vermehrung der Protozoen kann durch Teilung oder Knospung erfolgen:

Teilung: Die Teilung der Protozoen kann eine Zweiteilung (Binärteilung) oder eine Mehrfachteilung sein. Die Zellteilung erfolgt durch Mitose, die sich bei einigen Arten von der Mitose vielzelliger Lebewesen dadurch unterscheidet, dass bei der Mitose die Kernmembran nicht aufgelöst und der Spindelapparat im verschlossenen Kern ausgebildet wird (geschlossene Mitose).

Knospung: Die Knospung der Protozoen unterscheidet sich von der Zellteilung dadurch, dass sich eine Tochterzelle von der Mutterzelle abspaltet, die viel kleiner ist, und danach auf die Größe der Mutterzelle heranwachsen muss.

(B) Geschlechtliche Vermehrung

Bei der geschlechtlichen Vermehrung der Protozoen kommt es zum Genaustausch, aber nicht zur Bildung eines Embryos. Die geschlechtliche Vermehrung kann bei den Protozoen in die Reduktionsteilung mit Fusion und Konjugation unterteilt werden.

Reduktionsteilung mit Fusion: Bei dieser Fortpflanzungsaktivität kommt es durch die Reduktionsteilung (Meiose) zur Ausbildung von haploiden Zellen (Gameten) oder Gametenzellkernen. Die meisten Arten bilden zwei unterschiedlich aussehende Gameten (Anisogamie) aus („männliche“ und „weibliche“ Gameten).

Man kann in Bezug auf die Reihenfolge von Meiose und Fusion zwei Strategien unterscheiden:

- (1) Meiose vollzieht sich bei der Gametenbildung vor der Fusion der Gameten („Befruchtung“). Der Einzeller ist so lange diploid, bis Gameten gebildet werden.
- (2) Meiose vollzieht sich erst nach der Fusion (zygotäre Meiose). Der Einzeller ist so lange haploid, bis es wieder zu einer Befruchtung kommt, nach der er wieder haploid wird.

Manche Einzeller durchlaufen auch einen Generationswechsel, es gibt haploide und diploide Generationen, die sich beide jeweils vermehren können.

Konjugation: Kreuzweiser Austausch von Gametenzellkernen (siehe 2.5.B).

2.5 Beispielhafte Vertreter

(A) *Choanomonada* (Kragengeißeltiere)

Kragengeißeltiere bilden ein Taxon, das solitäre und koloniebildende Protozoen beinhaltet, deren Kennzeichen der spezielle Aufbau der Zelle und der damit verbundene Nahrungserwerb ist. Die Zelle besteht aus einem Kranz von Mikrovilli, die als Kragen bezeichnet werden, im Zentrum des Kranzes steht eine lange Geißel (Flagelle). Kragengeißeltiere leben aquatisch (im Süß- oder Salzwasser). Die Geißel erzeugt, wie oben bereits beschrieben, einen Wasserstrom, der Nahrungspartikel an die Mikrovilli spült. Die Mikrovilli wirken als Reuse und die Nahrungspartikel werden wie mit einem Netz eingefangen und an der Basis der Mikrovilli oder am Vorderpol des Zellkörpers phagocytiert. Manche Arten der Kragengeißeltiere bilden Gehäuse (Loricae). Kragengeißeltiere können sessil oder in Kolonieform schwebend vorkommen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Kragengeißeltiere zu den Choanocyten (Kragengeißelzellen) der Schwämme wird das Taxon als mögliche Herkunft der Metazoen diskutiert.

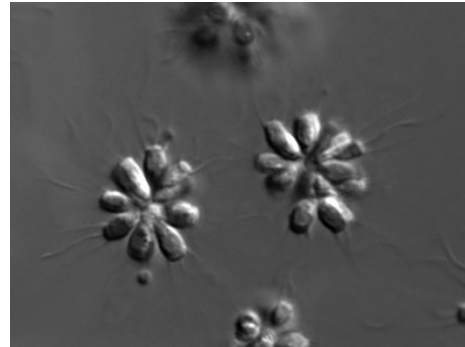


Abb.2.11: Kolonie Kragengeißeltiere

Bild: Mark J. Daye, o. J.

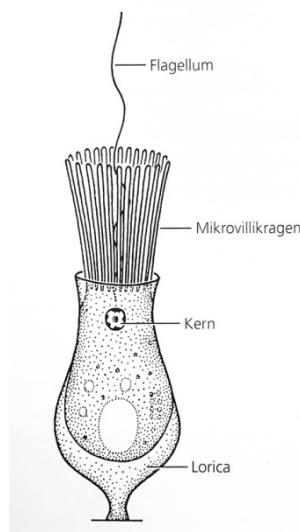


Abb.2.12: Bau Kragengeißeltier

Bild: Grell, 1980

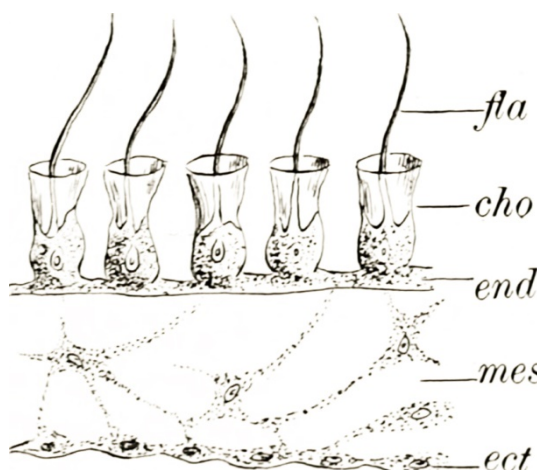


Abb.2.13: Aufbau Schwamm

Bild: American Museum of Natural History, 1901

Fla: Flagellate; cho: Choanocyt; end: Endopinacocyten; mes: Mesohyl; ect: Exopinacocyten

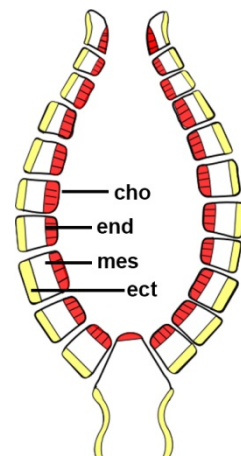


Abb.2.14: Längsschnitt durch Schwamm

Bild: Ewan ar Born, 2008, verändert

(B) *Paramecium* (Pantoffeltierchen)

Die Gattung *Paramecium* hat ihren Namen von der Ähnlichkeit zu einem Pantoffel. Pantoffeltierchen sind rundum mit Cilien (Wimpern) versehen. Die Vertreter der Gattung leben im Süßwasser, einige Arten auch im Brackwasser. Pantoffeltierchen bewegen sich durch die rhythmische Bewegung ihrer Cilien fort. Da die Cilien spiralförmig angeordnet sind, dreht sich das Tier bei der Fortbewegung um seine Längsachse, was zu einer schraubenförmigen Bewegung führt. Pantoffeltierchen sind länglich elyptisch und haben an einer Seite eine grubenartige Einsenkung, die Oralfurche. Am Ende der Oral-

furche sitzt der Zellmund (Cytostom). Pantoffeltierchen ernähren sich von Bakterien, Algen und Kleinstlebewesen, die durch den Schlag der Cilien in die Oralfurche zum Zellmund befördert und anschließend in Nahrungsvakuolen aufgenommen werden. Typischerweise sind zwei Arten von Zellkernen vorhanden, der Großkern (Makronucleus) und je nach Art ein oder viele Kleinkerne (Mikronucleus). Pantoffeltierchen können sich durch Zellteilung oder durch Konjugation fortpflanzen. Bei der Konjugation entstehen vorerst durch Meiose haploide Kleinkerne. Von diesen haploiden Kleinkernen gehen alle bis auf einen zugrunde. Der verbleibende Kleinkern teilt sich. Einer dieser Teile wird bei der Konjugation zweier Pantoffeltierchen ausgetauscht. Der ausgetauschte haploide Kleinkern verschmilzt mit dem zurückgebliebenen haploiden Kleinkern zu einem diploiden Vorkern. Der alte Großkern löst sich auf und der Vorkern wird zum Großkern.

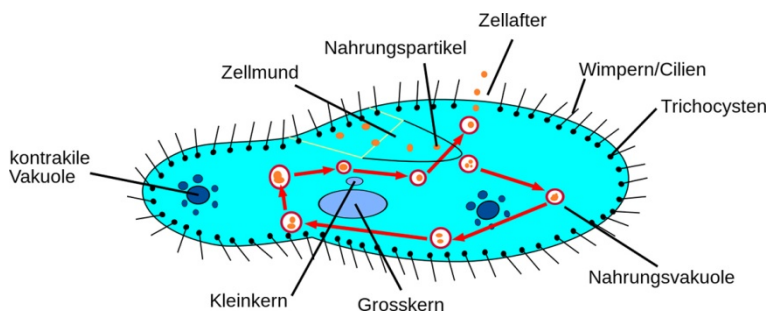


Abb.2.15: Bau Pantoffeltierchen

Bild: Michael Frey, 2008

(C) *Plasmodium vivax*

Plasmodium vivax ist eine der Protozoenarten, die bei Menschen die Krankheit Malaria auslösen. Die anderen Arten, die Malaria auslösen, sind: *Plasmodium falciparum*, *Plasmodium malariae*, *Plasmodium ovale*. *Plasmodium vivax*, wie auch die anderen Malaria auslösenden Protozoen, gehört in die Gruppe der Coccidea (Kokzidien). Kokzidien sind intrazelluläre Parasiten von wirbellosen Tiere und Wirbeltieren.

Der Malariaparasit wird von weiblichen Stechmücken übertragen. Über den Speichel der Stechmücke werden sogenannte **Sporozoiten** (Stadium des Einzellers) ins Blut übertragen. Über das Blut wandern die Sporozoiten in die Leber und befallen Leberzellen. In den Leberzellen vermehren sich die Sporozoiten asexuell über schizogone Vermehrung (Schizogonie: Zerfall des Zellkerns durch Mitose in mehrere Zellkerne und anschließende Zellteilung). Die entstandenen Nachkommen wandern in weitere Leberzellen ein und vermehren sich. Aus den Nachkommen bilden sich **Merozoiten**, die in Erythrocyten eindringen. In den Erythrocyten bilden sich aus den eingedrungenen Merozoiten **Trophozoiten**. Die Trophozoiten ernähren sich von Hämoglobin, hierbei entsteht als Abfallprodukt Hämozoin. Wenn ein Trophozoit herangewachsen ist, vermehrt er sich und es entstehen wieder viele Merozoiten. Hierdurch kommt es zum Platzen des Erythrocyten und zum Freiwerden von Merozoiten und Hämozoin. Die Merozoiten dringen in andere Erythrocyten ein und das Hämozoin reichert sich in der Milz, Leber und

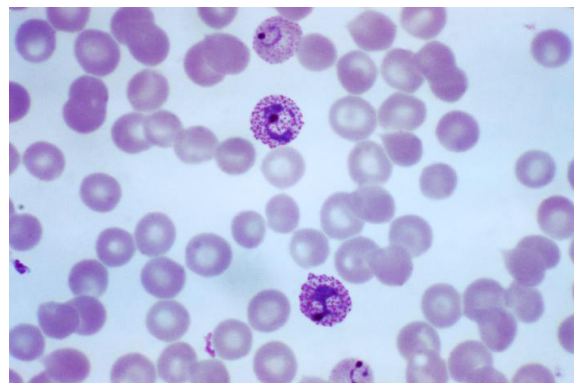


Abb.2.16: Trophozoiten in Erythrocyten

Bild: o. A.

anderen Organen an. Das Ausschütten des Hämozoids ist der Auslöser der Fieberschübe und Schüttelfrostanfalle. In manchen der befallenen Erythrocyten entstehen aus den Merozoiten **Mikrogametocyten** und **Makrogametocyten**. Werden die Mikrogametocyten und Makrogametocyten von einer Stechmücke über das Blutsaugen aufgenommen, reifen sie in der Stechmücke zu Gameten heran. Im Magen der Stechmücke kommt es zur Befruchtung und zum Eindringen der entstandenen **Ookineten** in den Körper der Mücke. Die Ookineten wandeln sich zu einer Oozyste um, in der sich Sporozoiten bilden, die zur Speicheldrüse wandern.



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

autotroph	heterotroph	osmotroph
Axonem	holozoisch	Phagocytose
Cilie	Knospung	Phagosom
Cytostom	Konjugation	phagotroph
Einzeller	Meiose	Pseudopodien
Eukaryot	Mikrotubuli	Supergruppe
Flagelle	Mikrovilli	Zellteilung
Generationswechsel	Mitose	zygotäre Meiose
geschlossene Mitose	mixotroph	

Aufgabe 2:

- (1) Grenzen Sie Protozoen von anderen Organismen ab.
- (2) Erklären Sie die Prozesse der Phagocytose.
- (3) Auf welche Art und Weise können Protozoen Beute fangen?
- (4) Vergleichen Sie die Geißelbewegung bei Bakterien und Protozoen.
- (5) Vergleichen Sie die unterschiedlichen Fortbewegungsarten der Protozoen.
- (6) Welche Strategien der Vermehrung von Protozoen sind ähnlich den Strategien bei Bakterien? Welche bei Pflanzen und welche bei Tieren?
- (7) Ordnen Sie die Organismen aus Abschnitt 2.5 den vier klassischen Gruppen (Flagellaten, Ciliaten, Amöben, Sporozoen) zu.

Literatur

- Adl, S. M.; Simpson, A. G. B.; Lane, C. E.; Lukeš, J.; Bass, D.; Bowser, S. S. et al. (2012): The revised classification of eukaryotes. In: *The Journal of eukaryotic microbiology*, 59 (5), 429–493.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Urry, L. A. (2015): *Biologie* (10., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Hickman, C. P.; Roberts, L. S.; Larson, A.; L'Anson, H.; Eisenhour, D. J. (2008): *Zoologie* (Unter Mitarbeit von Wolf-Michael Weber. 13., aktualisierte Aufl. [der engl. Ausg.]). München: Pearson.

- Madigan, M. T.; Martinko, J. M.; Stahl, D. A. & Clark, D. P. (2015): *Brock Mikrobiologie kompakt* (Pearson Studium, 13., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Sadava, D. E.; Hillis, D. M.; Heller, H. C. & Berenbaum, M. (2011): *Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Westheide, W.; Alberti, G. (Hg.) (2013): *Spezielle Zoologie: Einzeller und wirbellose Tiere* (3. Aufl.). Berlin: Springer Spektrum.
- Woese, C. R.; Kandler, O. & Wheelis, M. L. (1990): Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87 (12), 4576–4579.

Abbildungen

- Abbildung 2.1: **Lidttierchen**. Ursprünglicher Bild-Titel: Blepharisma japonicum, Heterotrichea, Ciliophora; Bild von: Frank Fox; 2012; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mikrofoto.de-Blepharisma_japonicum_15.jpg
- Abbildung 2.2: **Supergruppen der Eukarya**. Ursprünglicher Bild-Titel: A view of eukaryote phylogeny reflecting the classification presented herein; Bild aus: Adl, Sina M.; Simpson, Alastair G. B.; Lane, Christopher E.; Lukeš, Julius; Bass, David; Bowser, Samuel S. et al. (2012): The revised classification of eukaryotes. In: *The Journal of eukaryotic microbiology* 59 (5), S. 429–493 (S. 432).
- Abbildung 2.3: **Phagocytose und Verdauung**. Bild vom Autor.
- Abbildung 2.4: **Nasentierchen frisst Pantoffeltierchen**. Ursprünglicher Bild-Titel: Didinium nastrum frisst Paramecium; Bild von: S. O. Mast; 1909; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Didinium_nasutum_consuming_a_paramecium.jpg
- Abbildung 2.5: **Sauginfusor fängt Beute**. Ursprünglicher Bild-Titel: Ein Sauginfusor aus dem Süßwasser (links) fängt einen Einzeller; Bild von: Damián H. Zanette; 2008; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Suctoria1_wiki.jpg
- Abbildung 2.6: **Kragengeißeltierchen**. Ursprünglicher Bild-Titel: Codonosiga sp. Kolonie; Bild von: Daniel Stoupin; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Suctoria1_wiki.jpg
- Abbildung 2.7: **Flagelle Querschnitt**. Ursprünglicher Bild-Titel: Ransmission electron microscope imagine, showing an example of green algae; Bild von: Dartmouth Electron Microscope Facility; Dartmouth College; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Monosigidae#/media/Datei:M2-2cells.jpg>
- Abbildung 2.8: **Flagelle Querschnitt Schemenzeichnung**. Ursprünglicher Bild-Titel: A diagrammatic cross-section of an axoneme as seen from the top of the undulipodia; Bild von: Alexei Kouprianov; 2006; Lizenz: CC BY-SA 2.5; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Axoneme_cross-section.svg
- Abbildung 2.9: **Flagelle Längsschnitt**. Ursprünglicher Bild-Titel: Ransmission electron microscope imagine, showing an example of green algae; Bild von: Dartmouth Electron Microscope Facility; Dartmouth College; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chlamydomonas_TEM_09.jpg
- Abbildung 2.10: **Ausstülpung von Parapodien**. Ursprünglicher Bild-Titel: Protozoo *Chaos carolinense*; Bild von: Tsukii Yuuji; o. J.; Lizenz: CC BY-SA 2.5; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Scheinfüßchen#/media/Datei:Chaos_carolinense.jpg
- Abbildung 2.11: **Kolonie Kragengeißeltiere**. Ursprünglicher Bild-Titel: Salpingoeca rosetta Colonies; Bild von: Mark J. Daye; o. J.; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dayel_Protero_Colonies_inset.jpg
- Abbildung 2.12: **Bau Kragengeißelzelle**. Bild aus: Westheide, W.; Alberti, G. (Hg.) (2013): *Spezielle Zoologie: Einzeller und wirbellose Tiere* (3. Aufl.). Berlin: Springer Spektrum.
- Abbildung 2.13: **Aufbau Schwamm**. Bild von: American Museum of Natural History; 1901; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guide_leaflet_\(1901\)_\(14763631314\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guide_leaflet_(1901)_(14763631314).jpg)
- Abbildung 2.14: **Längsschnitt durch Schwamm**. Ursprünglicher Bild-Titel: Formes des éponges; Bild von: Ewan ar Born; 2008; verändert; Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porifera_Types-fr.svg

Abbildung 2.15: **Bau Pantoffeltierchen**. Ursprünglicher Bild-Titel: Pantoffeltierchen; Bild von: MichaelFrey; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Pantoffeltierchen#/media/Datei:Paramecium_Eating_De.svg

Abbildung 2.16: **Trophozoiten in Erythrocyten**. Ursprünglicher Bild-Titel: Trophozoiten von Plasmodium vivax im gefärbten Blutausstrich; Bild von: o. A.; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Immature_and_mature_trophozoites_of_the_Plasmodium_vivax_parasite_P_HIL_2720_lores.jpg

3. Wasser-Elektrolyt-Haushalt und Stickstoffausscheidung

Für die Organismen ist die Regulierung der chemischen Zusammensetzung der Körperflüssigkeiten essenziell. Körperflüssigkeiten finden sich in den Zellen (intrazelluläre Flüssigkeit) und außerhalb der Zellen im Körper (extrazelluläre Flüssigkeit). Für Lebewesen ist es wichtig,

- den osmotischen Druck der Körperflüssigkeiten zu steuern (Osmoregulation),
- den Wasserhaushalt zu regulieren,
- den Elektrolythaushalt einzustellen.

Bei all diesen Regulationen spielt die Abgabe und Rückgewinnung von Wasser und Elektrolyten eine bedeutende Rolle. Die Exkretion, zu der diese Prozesse gehören, wird zudem zur Beseitigung von Giftstoffen benötigt. Der Begriff Exkretion muss an dieser Stelle mit Bedacht gelesen werden, da als Exkretion die Abgabe bzw. Ausscheidung von nicht mehr verwendeten Stoffwechselprodukten aus dem Organismus bezeichnet wird (Campbell, 2015, S. 1800). Exkretion beinhaltet die Abgabe gelöster, festerer und gasförmiger Bestandteile. Exkretion findet somit über die Haut (Wasser und Elektrolyte), die Atmungsorgane (Atmungsgase), den Dickdarm (Kot) und die „Nieren“ (Wasser und Elektrolyte) statt.

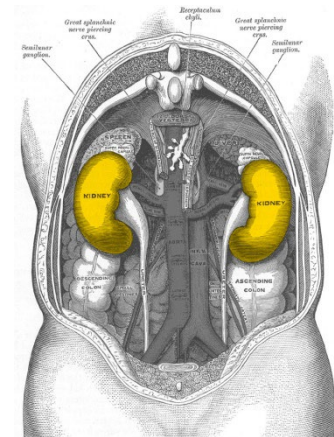


Abb. 3.1: Nieren Mensch

Bild: Roxbury, 2008

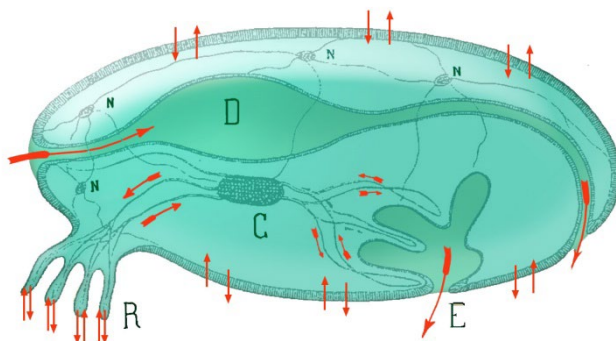


Abb. 3.2: Exkretions-Schema nach Paul Bert

C Blutkreislauf (oder Lymphe), D Verdauungstrakt, E Exkretionsöffnung, N Nervensystem, R Atmung, Rote Pfeile Stoffaufnahme und -abgabe

Bild: Bert, 1881 colored by Lamiot, 2012: Abbildung leicht verändert

Das folgende Kapitel fokussiert die Exkretion von Wasser und darin gelösten Substanzen sowie die Sekretion von Abfallstoffen.

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die unterschiedlichen Arten der Osmoregulation darstellen,
 - die Funktion von Wasser im Organismus erklären,
 - die wichtigsten Elektrolyte und ihre Funktion nennen,
 - die stickstoffhaltigen Exkretionsprodukte nennen,
 - exemplarische Exkretionsorgane in Aufbau und Funktion erläutern.

3.1 Osmoregulation

Um den Wasserhaushalt in einem Körper im Gleichgewicht zu halten, müssen die Abgabe und die Aufnahme von Wasser und hierin gelösten Teilchen (Elektrolyte und andere gelöste Stoffe) ausgeglichen werden. Wird zu viel Wasser aufgenommen und/oder zu wenig abgegeben, schwellen die Zellen an und können platzen. Wird zu wenig Wasser aufgenommen und/oder zu viel abgegeben, dehydrieren die Zellen (trocknen aus) und sterben ab.

Die Wasseraufnahme und -abgabe eines Organismus muss nicht alleine durch Trinken erfolgen, sondern erfolgt bei aquatischen Lebewesen vor allem durch Osmose. Bei der Osmose ist die Konzentration der beteiligten Flüssigkeiten für die Wanderrichtung (Diffusionsrichtung) ausschlaggebend. Als Beispiel diffundiert bei einem Tier mit hoher Anzahl gelöster Teilchen, welches in einer schwach konzentrierten Lösung schwimmt, das Wasser in den Körper des Tieres.

Um diese Wanderung des Wassers auszubalancieren, muss die Konzentration der Körperflüssigkeit reguliert werden. Diese Ausbalancierung nennt man Osmoregulation.

Tiere können osmotischen Herausforderungen auf unterschiedliche Arten begegnen, es gibt Osmokonformer und Osmoregulierer.

Osmokonformer: Die Konzentration der Körperflüssigkeit ist gleich der Konzentration der Umgebung. Osmokonformer passen die Osmolarität ihrer Körperflüssigkeiten der Osmolarität der Umgebung an. Die Anpassung kann passiv oder aktiv erfolgen. Viele Meeresbewohner sind Osmokonformer.

Osmoregulierer: Die Konzentration der Körperflüssigkeit entspricht nicht der der Umgebung. Wasser muss ständig aufgenommen bzw. abgegeben werden. Vor allem Süßwasserbewohner oder terrestrische Tiere sind Osmoregulierer. Man unterscheidet zwischen *hyperosmotischen Regulierern* und *hypoosmotischen Regulierern*. Hyperosmotische Regulierer haben einen höheren osmotischen Wert im

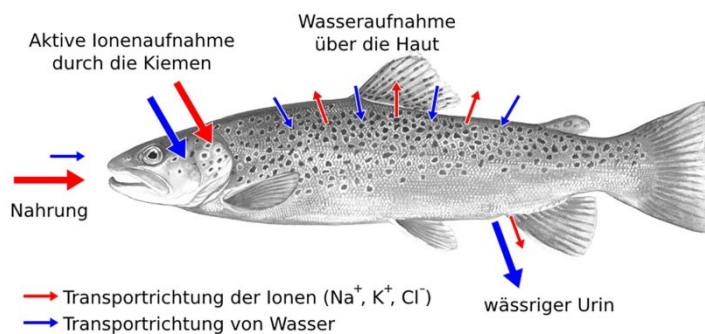


Abb. 3.3: Hyperosmotischer Regulierer: Bachforelle

Bild: Raver, modified by Biezl, o.J.

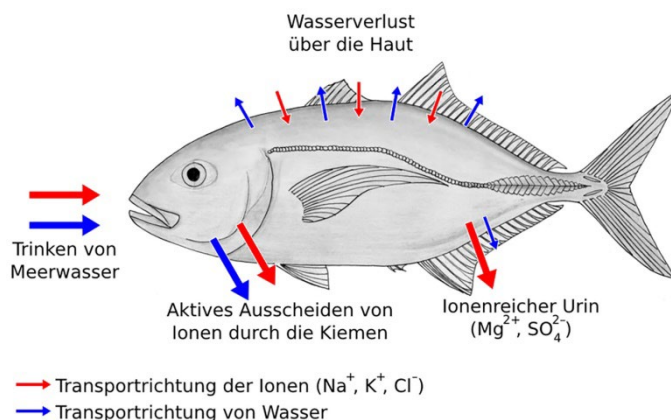


Abb. 3.4: Hypoosmotischer Regulierer: Stachelmakrele

Bild: Kare, modified by Biezl, o.J.

Körperinneren im Vergleich zu ihrer Umgebung. Hypoosmotische Regulierer haben einen niedrigeren osmotischen Wert im Körperinneren im Vergleich zu ihrer Umgebung.

Viele Tiere – egal ob Osmokonformer oder Osmoregulierer – können keine Veränderung der Osmolarität der Umgebung aushalten, man bezeichnet sie als **stenohalin**. Tiere, die solche Veränderungen tolerieren, werden als **euryhalin** Tiere bezeichnet.

Tabelle 3.1: Osmoregulation

		Veränderung der Umgebung	
		stenohalin	euryhalin
Konzentration der Körperflüssigkeit	Osmokonformer	stenohaline Osmokonformer Bsp.: viele wirbellose Meerestiere	euryhaline Osmokonformer Bsp.: sessile Meerestiere, die von Ebbe und Flut betroffen sind
	Osmoregulierer	stenohaline Osmoregulierer Bsp.: viele Süßwasserfische	euryhaline Osmoregulierer Bsp.: Lachsarten, die vom Süßwasser ins Meerwasser wandern

3.2 Wasser

Das Wasser spielt im Körper nicht nur eine Rolle als wandernde Flüssigkeit bei der Osmose. Wasser hat in den Organismen wichtige Funktionen.

Wasser ist:

- ein Transportmittel, in ihm können sich Stoffe wie Mineralstoffe, Elektrolyte oder Nährstoffe lösen und hierdurch mithilfe des Wassers von A nach B transportiert werden. Wasser findet sich im Blut bzw. in der Hämolymphe, in der Lymphe und im Cytoplasma,
- als Molekül ein wichtiger Reaktionspartner (Bsp.: Reaktion von H_2O mit CO_2 zu H_2CO_3),
- ein Baustoff und wird zum Aufbau von unterschiedlichsten Molekülen benötigt (Bsp.: Kohlenhydrate),
- wichtig für die Wärmeregulation bei gleichwarmen Tieren. Wasser kann viel Energie (Wärmeenergie) zugeführt werden, ohne dass sich die Temperatur des Wassers verändert. Auch durch die Veränderung des Aggregatzustandes (flüssig zu gasförmig) beim Schwitzen und Hecheln wird Energie benötigt, die der Wärmeenergie entzogen wird,
- in manchen Organismen der passive Bewegungsapparat (Hydroskelett), wie beispielsweise bei den Nesseltieren, Ringelwürmern oder Weichtieren.

3.3 Elektrolyte

Elektrolyte sind Atome oder Moleküle, die als Ionen (Kationen und Anionen) vorliegen und daher elektrische Ladungen tragen. Die Konzentration von Elektrolyten in einer Lösung bestimmt mit anderen osmotisch wirkenden Stoffen (z. B. Glucose, Proteinen) den osmotischen Druck der Lösung. Die Elektrolyte haben aber in den Organismen noch weitere Aufgaben. Einen Überblick über wichtige Elektrolyte bietet Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Funktionen ausgewählter Elektrolyte

<i>Natrium Na⁺</i>	- Erregung von Nerven- und Muskelzellen - Bildung Membranpotenzial - Regulation des osmotischen Drucks
<i>Kalium K⁺</i>	- Erregung von Nerven- und Muskelzellen - Bildung Membranpotenzial - Regulation des osmotischen Drucks
<i>Calcium Ca²⁺</i>	- Verleiht bei Wirbeltieren Knochen und Zähnen Festigkeit - Beeinflusst die Permeabilität (Durchlässigkeit) der Zellmembranen - Steuerung der Myosin-Anbindungsstellen bei Muskelkontraktionen - Exocytose der Neurotransmitter - Wichtig für die Blutgerinnung - Wirkt auf die Herzaktivität ein
<i>Magnesium Mg²⁺</i>	- Enzymaktivator beim Energiestoffwechsel
<i>Chlorid Cl⁻</i>	- Regulation des osmotischen Drucks - Salzsäureproduktion im Magen
<i>Phosphat HPO₄²⁻</i> (Hydrogenphosphat)	- Bestandteil der Knochen und Zähne bei Wirbeltieren - Unentbehrlich für den intermediären Stoffwechsel (ATP)

3.4 Stickstoffhaltige Exkretionsprodukte

Beim Verstoffwechseln von Nährstoffen entstehen „Abfallprodukte“. Diese sind bei Fetten und Kohlenhydraten CO₂ und H₂O, bei Proteinen und Nucleinsäuren entstehen zudem stickstoffhaltige Produkte. Das häufigste Abfallprodukt beim Stickstoffstoffwechsel ist Ammoniak NH₃, Ammoniak ist hochgiftig und muss entweder sofort ausgeschieden werden, was mit einem hohen Wasserverlust einhergeht, oder umgebaut werden.

Viele im Wasser lebende Tiere (wirbellose Tiere und Knochenfische) scheiden **Ammoniak NH₃**, das mit Wasser zu einem **Ammoniumion NH₄⁺** dissoziiert, über die Kiemen aus. Dies ist für diese Tiere möglich, da das Ammoniumion sehr gut in Wasser löslich ist und diese Tiere von Wasser umgeben sind, in das die Ammoniumionen durch Diffusion abgegeben werden können. Bei landlebenden Tieren ist dies nicht möglich. Da hier das sich anreichernde Ammoniak toxisch wirken würde, wird das Ammonium in eine andere chemische Form gebracht. Es wird zu Harnstoff oder Harnsäure umgebaut.

Harnstoff: Säugetiere, Amphibien und Knorpelfische bilden aus einem großen Teil des Ammoniaks Harnstoff. Harnstoff ist sehr gut wasserlöslich, was wiederum aber auch zur Folge hat, dass zur Ausscheidung viel Wasser notwendig ist. Die Bildung von Harnstoff ist mit einem Energieaufwand verbunden: $2 \text{ NH}_3 + \text{CO}_2 + 3 \text{ ATP} \rightarrow \text{Harnstoff}$

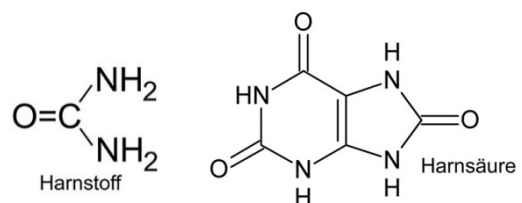


Abb. 3.5: Harnstoff und Harnsäure

Harnsäure: Einige Tiere wie Vögel, Insekten, Reptilien, Landschnecken und manche Amphibien bilden aus dem Großteil des Ammoniaks Harnsäure, dadurch sparen sie Wasser, und zudem bringt es einen Vorteil bei der Entwicklung der Jungtiere im Kalkschalei, da die Abbauprodukte „abgelegt“ werden können und nicht ins Wasser diffundieren, in dem das Jungtier heranwächst. Harnsäure ist schlecht wasserlöslich und wird als Suspension mit dem Harn ausgeschieden. Die Produktion von Harnsäure ist sehr energieaufwendig.

3.5 Exkretionsorgane

Die Exkretionsorgane, die den Wasser-Elektrolyt-Haushalt steuern und stickstoffhaltige Exkretionsprodukte ausscheiden, sind in ihrer Grundfunktion sehr ähnlich (siehe Abb. 3.6). In einem ersten Schritt wird der Primärharn gebildet. Dies erfolgt über die **Filtration**, bei der das Blut oder die Hämolymphe mit hohem Druck auf ein poriges Epithel treffen, wodurch (wie bei einem Kaffeefilter) die Flüssigkeit und alle durch die Poren passenden Moleküle aus der Blutflüssigkeit strömen. Nach dem Auffangen des Filtrates, das Primärharn genannt wird, wird dieses über einen Tubulus (Röhre) transportiert. Über den Tubulus können weitere Stoffe aktiv in den Primärharn gegeben werden. Dieser Vorgang wird **Sekretion** genannt. Beim Durchlaufen des Tubulus werden alle für den Organismus wichtigen Stoffe (Wasser, Elektrolyte, Aminosäuren, Glucose) rückresorbiert (**Reabsorption**). Nun erst entsteht der Harn, der aus dem Körper abgegeben wird (**Ausscheidung**).

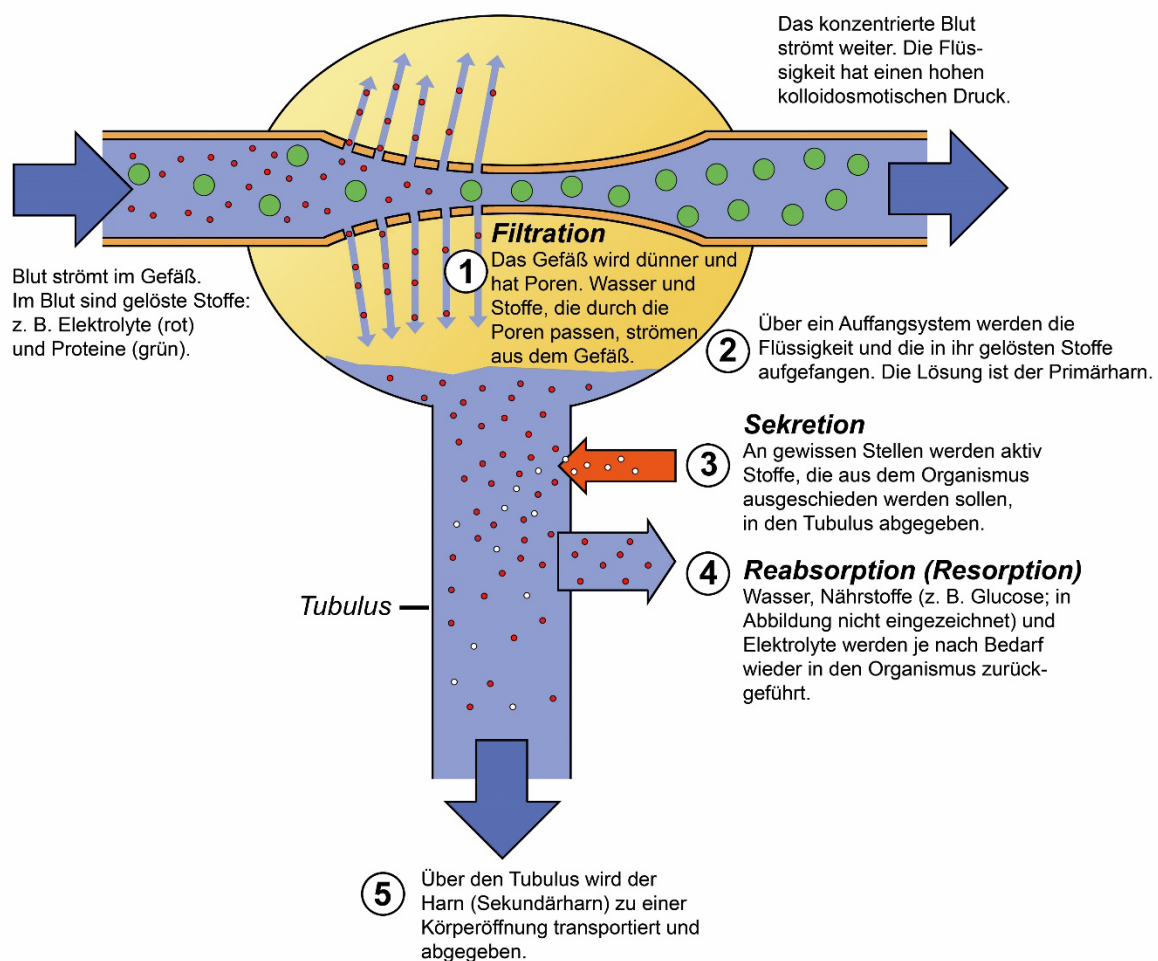


Abb. 3.6: Grundschemata: Vom Primärharn zum Sekundärharn

(A) Kontraktile Vakuole

Manche Einzeller wie z. B. Pantoffeltierchen (*Paramecium aurelia*) oder Euglenen (*Euglena*) haben kontraktile Vakuolen (pulsierende Vakuolen), mit denen sie die Wassermenge im Cytoplasma regulieren können. Kontraktile Vakuolen finden sich hauptsächlich bei Süßwasserorganismen, die über Osmose zu viel Wasser aufnehmen, da die Elektrolytkonzentration des Cytoplasmas (hyperton) zum Vergleich zum Außenmedium (hypoton) größer ist. Könnten die Süßwasserorganismen das Wasser nicht abgeben, würden sie platzen.

Beim Exkretionsvorgang wird Cytoplasmaflüssigkeit aus sternförmig auf die Vakuolen zulaufenden Kanälen (siehe unterer Strich Abb. 3.7) in die Vakuole aufgenommen. Die Aufnahme erfolgt durch die rhythmische Vergrößerung der Vakuole. Aus der Vakuole werden aktiv Elektrolyte ins Cytoplasma zurücktransportiert (Reabsorption). Nach der Vergrößerung kontrahiert die Vakuole. Ein vorhandener Porus öffnet sich und die Vakuolenflüssigkeit wird abgegeben.

Ob über die Vakuole auch wasserlösliche Stoffe aus den Einzellern ausgeschieden werden können, ist noch unklar.

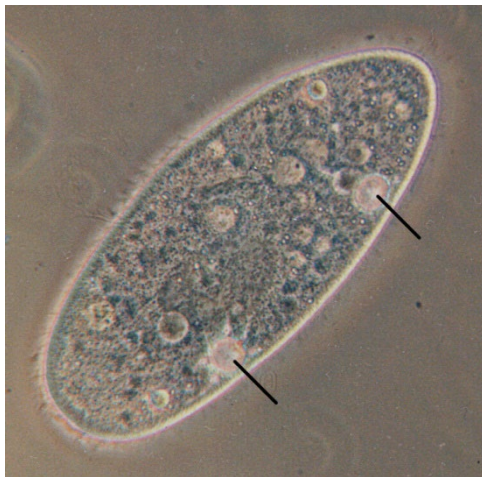


Abb. 3.7: Kontraktile Vakuole beim Pantoffeltierchen
(*Paramecium aurelia*)
Striche: kontraktile Vakuolen
Bild: Grosse, 2008

(B) Metanephridien

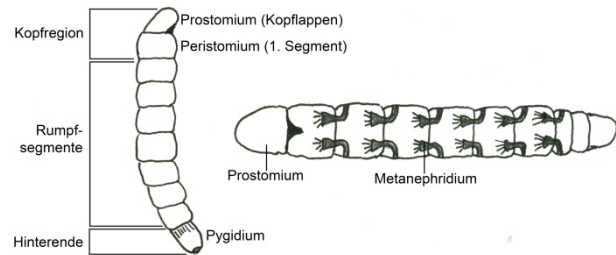
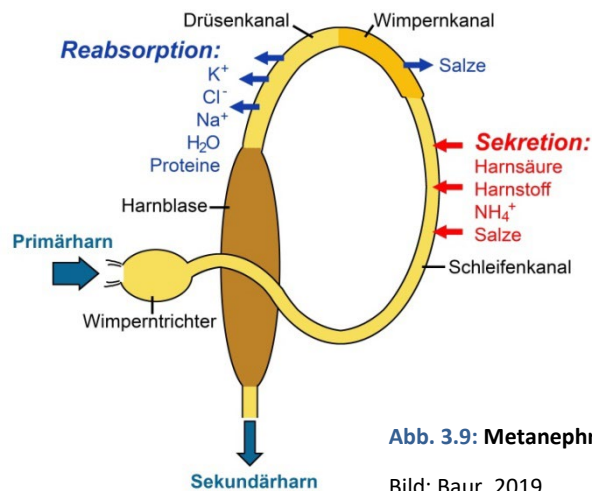
Bei den Anneliden (Ringelwürmern) erfolgt die Exkretion von Wasser, Elektrolyten und stickstoffhaltigen Abbauprodukten über die Metanephridien, die man paarweise in fast jedem Segment (im Peristomium und in den Rumpfsegmenten) findet.

Die Metanephridien beginnen mit einem offenen Wimperntrichter im Coelom. Die Filtration erfolgt über dem Wimperntrichter nahe gelegene Blutgefäße ins Coelom. Durch die Wimpern am Wimperntrichter wird Flüssigkeit (Primärharn) in die Metanephridien aufgenommen. Beim Transport durch den Nephridienkanal (Tubulus) wird der Harn verändert (Sekretion und Reabsorption). Blutgefäßkapillaren, die sich um den Schleifen-, Wimpern- und Drüsenkanal befinden, nehmen die rückresorbierten Stoffe auf.



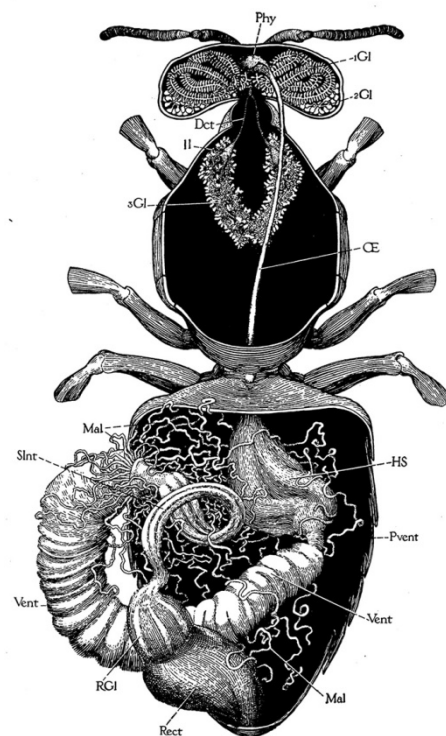
Abb. 3.8: Kompostwurm
(*Eisenia fetida*)

Bild: Baur, 2019



(C) Malpighi-Gefäße

Die Malpighi-Gefäße sind die Exkretionsorgane der landlebenden Gliederfüßer (*Arthropoda*). Die Malpighi-Gefäße sind lange Ausstülpungen des Darms, die zwischen Mittel- und Enddarm entspringen (siehe Abb. 3.11: Mal. = Malpighi-Gefäße). Die Anzahl dieser Ausstülpungen ist von Art zu Art sehr unterschiedlich (zwischen zwei und 150 Ausstülpungen wurden bei den einzelnen Arten entdeckt). Durch Sekretion von K^+ in die Malpighi-Gefäße strömen Wasser und hierin gelöste Stoffe osmotisch nach, dies bildet den Primärharn. Der Primärharn wird in den proximalen Bereichen der Malpighi-Gefäße und im Enddarm verändert. Durch Rückresorption (Reabsorption) werden Wasser, Elektrolyte, Glucose und Aminosäuren wieder in die Körperflüssigkeit (Hämolymphe) zurücktransportiert. Im Vergleich zu den anderen Exkretionsorganen spielt die Filtration bei den Malpighi-Gefäßen – wie auch bei den kontraktile Vakuolen – keine Rolle.



(D) Niere der Säugetiere

Die Niere ist aus dem Nierenmark und der Nierenrinde aufgebaut. Beide Schichten durchlaufend liegen darin die kleinsten Funktionseinheiten der Niere, die Nephronen. Ein Nephron besteht aus dem Glomerulum (Knäuel an Kapillaren), das sich in der Bowman-Kapsel befindet. Die Bowman-Kapsel geht in ein Tubulussystem (proximaler Tubulus, Henle-Schleife, distaler Tubulus) über, welches zusammen mit anderen Tubulussystemen anderer Nephronen in ein Sammelrohr mündet. Das Sammelrohr transportiert den Harn in das Nierenbecken.

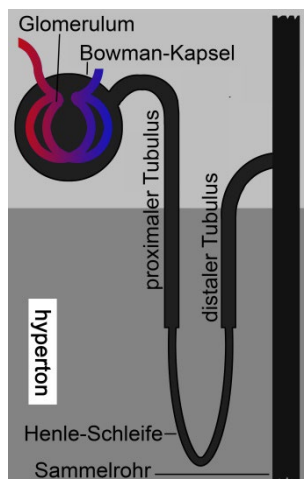


Abb. 3.12: Nephron

Bild: Baur, 2019

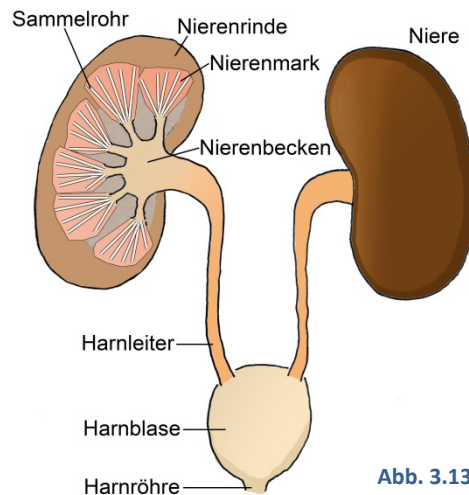


Abb. 3.13: Nieren der Säugetiere

Bild: Baur, 2019

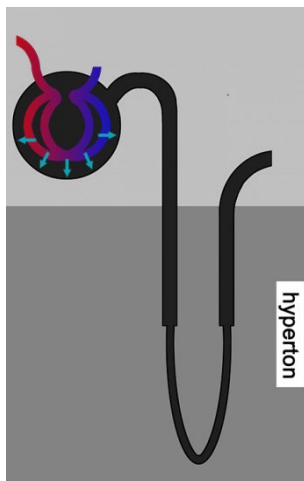


Abb. 3.14: Filtration

Bild: Baur, 2019

Im Glomerulum kommt es durch die Führung des Blutes mit Druck (Blutdruck) in kleine offenporige Gefäße zur Filtration des Blutes. Das Filtrat (Primärharn) wird von der Bowman-Kapsel aufgefangen (Abb. 3.14).

Am Anfang des proximalen Tubulus werden durch Sekretion Harnstoff und auch Harnsäuren in den Primärharn gegeben. Zudem werden im proximalen Tubulus Ionen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), Aminosäuren, Glucose und Wasser rückresorbiert. Der Transport der Stoffe erfolgt je nach Stoff aktiv oder passiv.

Der absteigende Ast der Henle-Schleife ist für Wassermoleküle durchlässig. Für Ionen ist er undurchlässig. Dem Harn wird durch Osmose (Hypertonie des Nierenmarks) Wasser entzogen.

Im aufsteigenden Ast ist die Durchlässigkeit für Wasser gering. Hier erfolgt eine Rückresorption (Reabsorption) von Na^+Cl^- ins Gewebe. Dies führt zur Hypertonie des Nierenmarks.

Im distalen Tubulus finden eine Rückresorption (Reabsorption) von Na^+ , Cl^- und HCO_3^- und eine Sezernierung von H^+ und K^+ statt.

Über die Blutgefäße, die das Tubulussystem umspannen, werden die rückresorbierten Stoffe zurück ins Blut aufgenommen.

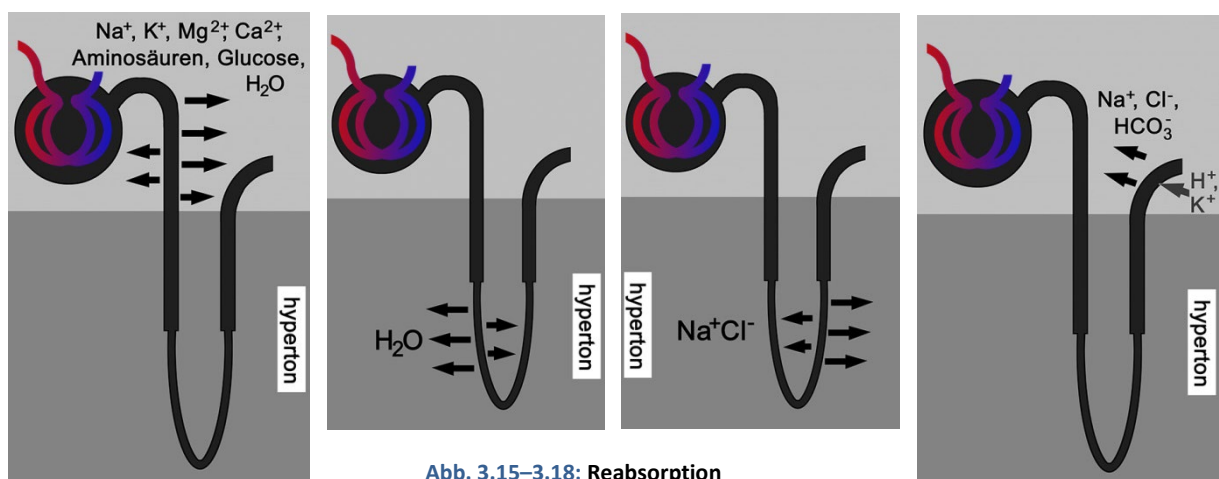


Abb. 3.15–3.18: Reabsorption

Bild: Baur, 2019



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

Elektrolyte	Malpighi-Gefäße	osmotischer Druck
euryhalin	Metanephridium	Reabsorption
Exkretion	Nephron	Resorption
Filtration	Osmokonformer	Sekretion
hyperosmotisch	Osmoregulation	stenohalin
hypoosmotisch	Osmoregulierer	

Aufgabe 2:

- (1) Worin unterscheiden sich die osmotischen Bedingungen von aquatischen Tieren im Süßwasser von denen im Meerwasser?
- (2) Worin liegen die Herausforderungen in Bezug auf die Aufrechterhaltung des Wasser-Elektrolyt-Haushalts bei terrestrischen Tieren? [●]
- (3) Wozu benötigen Lebewesen Wasser?
- (4) Wozu benötigen Lebewesen Elektrolyte?
- (5) Welche stickstoffhaltigen Exkretionsprodukte gibt es?
- (6) Vergleichen Sie den Primärharn und den Sekundärharn (Sekundärharn = Harn).
- (7) Wählen Sie sich ein Exkretionsorgan und erklären Sie dessen Funktion.
- (8) Vergleichen Sie die Exkretionsorgane. Worin unterscheiden sie sich und was ist identisch?

Literatur

- Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierende. Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Urry, L. A. (2015). *Biologie* (10., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Heldmaier, G., Neuweiler, G. & Rössler, W. (2013). *Vergleichende Tierphysiologie* (Springer-Lehrbuch, 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (Lehrbuch, 8. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Munk, K. (Hrsg.) (2011). *Zoologie* (2., erweiterter Druck). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Sadava, D. E., Hillis, D. M., Heller, H. C. & Berenbaum, M. (2011). *Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Wehner, R. & Gehring, W. J. (2013). *Zoologie* (25. Auflage). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Abbildungen

Abbildung 3.1: **Nieren Mensch**. Ursprünglicher Bildtitel: Lage der Nieren, gesehen *von hinten*; Bild von: Roxbury; 2008; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Niere#/media/File:Gray1120-kidneys.png>

Abbildung 3.2: **Exkretions-Schema nach Paul Bert**. Ursprünglicher Bildtitel: Exkretions-Schema nach Paul Bert; Bild von: Paul Bert, 1881 colored by Lamiot; 2012; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animal_théorique.jpg; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 3.3: **Hyperosmotischer Regulierer: Bachforelle**. Ursprünglicher Bildtitel: Osmoregulation Bachforelle Zeichnung; Bild von: Duane Raver, modified by Biezl; o. J.; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Osmoregulation_Bachforelle_Zeichnung_bw.png

Abbildung 3.4: **Hypoosmotischer Regulierer: Stachelmakrele**. Ursprünglicher Bildtitel: Osmoseregulation Carangoides bartholomaei; Bild von: Kare Kare, modified by Biezl; o. J.; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Osmoseragulation_Carangoides_bartholomaei_bw.png

Abbildung 3.5: **Harnstoff und Harnsäure**. Bild von: o. A.

Abbildung 3.6: **Grundschema: Vom Primärharn zum Sekundärharn**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.7: **Kontraktile Vakuole beim Pantoffeltierchen**. Ursprünglicher Bildtitel: Pantoffeltierchen Paramecium aurelia mit kontraktile Vakuolen; Bild von: Josh Grosse; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paramecium_contractile_vacuoles.jpg

Abbildung 3.8: **Kompostwurm**. Bild von: Armin Baur; 2016.

Abbildung 3.9: **Metanephridium**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.10: **Aufbau Ringelwurm**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.11: **Verdauungstrakt Biene**. Ursprünglicher Bildtitel: Alimentary canal of worker; Bild von: R. E. Snodgrass, 1910; The Anatomie of the Honey Bee. Washington: Government Printing Office, S. 85.

Abbildung 3.12: **Nephron**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.13: **Nieren der Säugetiere**. Bild von: Armin Baur; 2017.

Abbildung 3.14: **Filtration**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.15–3.18: **Reabsorption**. Bild von: Armin Baur; 2019.