

Prof. Dr. Armin Baur M.A.

Vorlesung: Zoologie 1

Einführung in die Zoologie



Skript zur Vorlesung

für

Bachelorstudiengang Bildung im Sekundarbereich – Modul BIO 01,

Bachelorstudiengang Sonderpädagogik – Modul BIO 01,

Masterstudiengang Lehramt Grundschule – Modul SU-NT 05B

. Auflage 202

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. Die tierische Zelle	7
1.1 Aufbau der tierischen Zelle	7
1.2 Aufbau und Funktion der Zellbestandteile.....	8
1.3 Transportvorgänge in die Zelle und aus der Zelle	13
2. Kreislaufsysteme und „Blut“	17
2.1 Aufgaben eines Kreislaufsystems	17
2.2 Kreislaufsysteme	18
2.3 Herz-Reizleitung	22
2.4 Unterschiede in der „Blutflüssigkeit“	23
2.5 Funktion Blut und Hämolymphe	24
3. Atmung	27
3.1 Grundbegriffe Atmung	27
3.2 Unterschiede zwischen Land- und Wassertieren.....	29
3.3 Atmungsorgane	29
3.4 Zellatmung.....	35
4. Nahrungserwerb und Verdauung	39
4.1 Nahrungserwerb.....	39
4.2 Verdauung und Stoffwechsel	42
5. Lokomotion	49
5.1 Fortbewegungsarten	49
5.2 Bewegungsapparat.....	52

6. Nervensysteme	59
6.1 Aufgaben eines Nervensystems	59
6.2 Bestandteile eines Nervensystems	60
6.3 Nervensysteme.....	62
6.4 Aktionspotenzial.....	65
7. Sinne, Sinnesrezeptoren und Sinnesorgane	69
7.1 Umweltreize, die Tiere wahrnehmen können	69
7.2 Sinnesrezeptoren	73
7.3 Sinnesorgane	78

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. Die tierische Zelle

Alle Organismen sind aus einer oder mehreren Zellen aufgebaut. Ein erwachsener Mensch besteht aus ca. 100 Billionen Zellen. Egal ob Einzeller oder Vielzeller, die Zellstruktur der Eukaryoten ist in Bezug auf ihre Zellbestandteile sehr ähnlich. Bei den meisten Vielzellern bilden die Zellen Gewebe. Gewebe bestehen aus gleichartigen oder unterschiedlichen Zellen, die eine Funktionseinheit bilden. Man kann zwischen Epithelgewebe, Binde- und Stützgewebe, Muskelgewebe, Nervengewebe und bei manchen Organen spezifischem Gewebe unterscheiden. Die verschiedenen Gewebe sind die Elemente, aus denen wiederum die Organe aufgebaut sind. Die Organe bilden Organsysteme und diese in ihrer Gesamtheit den Körper.

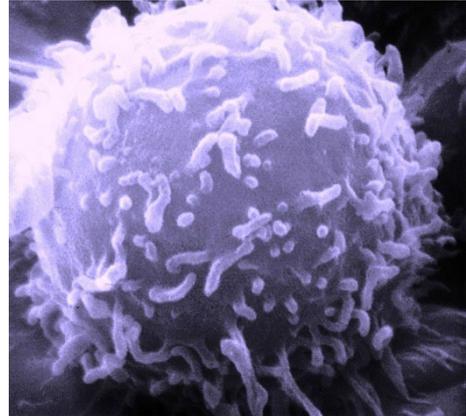


Abb. 1.1: Lymphocyt

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme

Bild: Triche, 1976

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- den Aufbau einer tierischen Zelle beschreiben,
 - eine tierische Zelle von anderen Zellen abgrenzen,
 - die Zellorganellen erkennen,
 - die Zellorganellen benennen,
 - die Funktionen der Zellorganellen erklären,
 - die Transportvorgänge durch die Zellmembran beschreiben.

1.1 Aufbau der tierischen Zelle

Egal, ob es sich um eine Nervenzelle, eine Muskelzelle, eine Fettzelle oder einen Einzeller handelt, die Zellen von Eukaryoten (alle Organismen mit Ausnahme von Bakterien und Archaeen) sind, wie oben bereits erwähnt, in Bezug auf ihre Zellbestandteile sehr ähnlich aufgebaut. Zum Teil gibt es bei den Zellstrukturen der Eukaryoten auch Ähnlichkeiten zu den Zellen der Prokaryoten (Bakterien und Archaeen). Man kann bei den Eukaryotenzellen zwischen tierischen und pflanzlichen Zellen unterscheiden. Zu den Organismen, die tierische Zellen besitzen, zählen verschiedene Protozoen (tierische Einzeller) und Metazoen (mehrzellige Tiere).

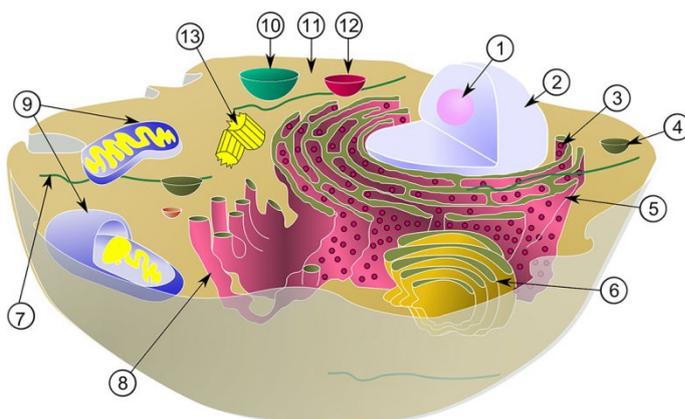


Abb. 1.2: Aufbau tierische Zelle

- (1) Nucleolus
- (2) Zellkern (Nucleus)
- (3) Ribosom
- (4) Vesikel
- (5) Raues endoplasmatisches Reticulum
- (6) Golgi-Apparat
- (7) Mikrotubuli (Cytoskelett)
- (8) Glattes endoplasmatisches Retikulum
- (9) Mitochondrien
- (10) Lysosom
- (11) Cytosol
- (12) Peroxisom
- (13) Zentriolen

Bild: Messer, 2006

Die tierische Zelle ist aus Membranen (z. B. Zellmembran, Membrane, die den Golgi-Apparat bilden), membranumgebenen Zellorganellen (z. B. Zellkern, Mitochondrien), nicht membranumgebenen Strukturen (z. B. Ribosomen, Nucleolus) und dem Cytosol (Cytoplasma) aufgebaut. Der Aufbau wird in Abbildung 1.2 schemenhaft dargestellt.

1.2 Aufbau und Funktion der Zellbestandteile

(A) Nucleolus

Der Nucleolus (das Kernkörperchen) ist ein Teil des Zellkerns. Im Nucleolus werden Untereinheiten der Ribosomen aufgebaut. Je nach Zelle kann es einen oder mehrere Nucleoli geben. Der Nucleolus ist nicht von einer Membran umgeben. Die entstandenen ribosomalen Untereinheiten werden im Cytosol zusammengebaut und dadurch funktionsfähig. (In Abb. 1.2: [1])

(B) Zellkern (Nucleus)

Der Zellkern (Nucleus – auch Nukleus) beinhaltet die Gene (DNA) der Zelle. Hierbei muss beachtet werden, dass einige Zellorganellen eine eigene DNA haben, wie die Mitochondrien bei tierischen und pflanzlichen Zellen und auch die Plasmiden der pflanzlichen Zellen. Der Nucleus ist von einer Doppel-Membran umgeben, die den Kerninhalt vom Cytosol abtrennt. Die innere Membran enthält viele Proteine, die Bindungsstellen für die Chromosomen und Anker für die Kernlamina (Geflecht aus Proteinfilamenten, das die Kernhülle strukturell stützt) sind. Die äußere Membran, die mit der Membran des endoplasmatischen Retikulums verbunden ist, ist dieser Membran sehr ähnlich in ihrem Aufbau. Alle Stoffe, die in den Zellkern oder aus ihm hinaus wandern, müssen die Poren der Kernmembran passieren. In den Zellkern werden beispielsweise Zell-Proteine und aus dem Zellkern mRNA und ribosomale Untereinheiten transportiert.

Im Zellkern findet die Transkription statt. Die mRNA, die bei der Transkription entsteht, verlässt den Zellkern und bewirkt an den Ribosomen den Aufbau von Proteinen (Translation). Über den Aufbau von Proteinen (Enzyme, Bauteile) wird die Zelltätigkeit gesteuert. (In Abb. 1.2: [2])

(C) Ribosomen

Ein Ribosom ist aus rRNA und Proteinen aufgebaut. Im Cytosol befinden sich Millionen von Ribosomen. Am Ribosom werden die mRNA entschlüsselt und Proteine aufgebaut (Translation). Ribosomen sind frei im Cytosol vorhanden oder an eine Membran gebunden (Membran des rauen endoplasmatischen Retikulums oder Zellkerns). Die Bindung der Ribosomen erfolgt bei der Proteinsynthese und wird vom entstehenden Protein (N-terminaler Bereich) bestimmt. An den freien Ribosomen werden Proteine, die in der Zelle verbleiben, synthetisiert (z. B. Enzyme zur Glykolyse). An den membrangebundenen Ribosomen findet die Synthese von Proteinen statt, die aus der Zelle geschleust (z. B. Verdauungsenzyme), in die Zellorganellen gegeben oder in die Zellmembran eingebaut werden. (In Abb. 1.2: [3])

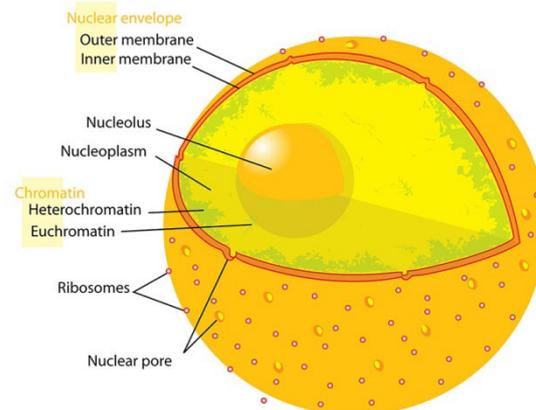


Abb. 1.3: Nucleus

Bild: Ruiz, 2006

(D) Vesikel

Vesikel sind intrazelluläre kleine Bläschen (Membranbläschen), die von einer Membran (einfache oder doppelte Membran) umschlossen sind. Vesikel sind Vehikel, in denen Stoffe transportiert oder kurzzeitig gespeichert werden. (in Abb. 1.2: [4])

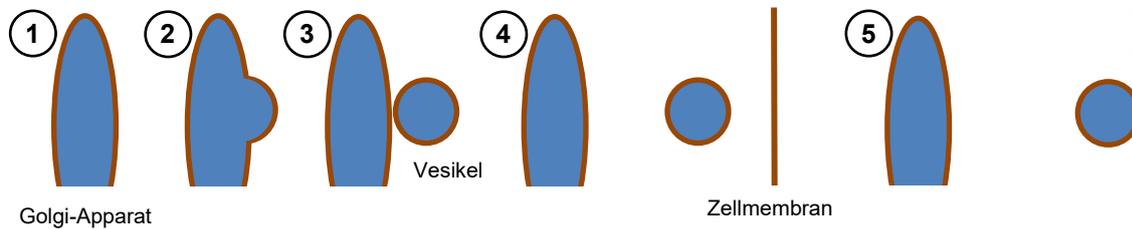


Abb. 1.4: Bildung eines Vesikels und Exocytose

Bild: Baur, 2019

(E) Endoplasmatisches Retikulum (ER)

Das endoplasmatische Retikulum ist ein Labyrinth von verbundenen Zisternen. Anders ausgedrückt handelt es sich um viele zusammenhängende flache Hohlräume. Das ER ist von einer Membran umgeben, die das Innere des ER vom Cytosol trennt. Diese Membran geht in die äußere Membran des Zellkerns über. Kernhülle und ER stellen dadurch ein morphologisches Kontinuum dar. Hierbei gibt es eine Verbindung des inneren Raums des ER mit dem perinukleären Raum (Raum zwischen äußerer und innerer Kernmembran).

Das ER kann in das glatte ER und in das raue ER unterteilt werden.

Im glatten ER werden verschiedene Stoffe – nicht Proteine – synthetisiert (z. B. Fettsäuren, Lipide) oder Stoffe gespeichert (Glucose in Form von Glykogen). (In Abb. 1.2: [8])

Im rauhen ER werden durch die sich anlagernden Ribosomen Proteine produziert (siehe Ribosomen). (In Abb. 1.2: [5])

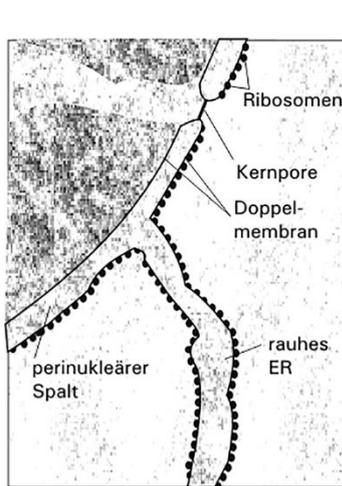


Abb. 1.5: Kernmembran

Bild: Wolber, 2005

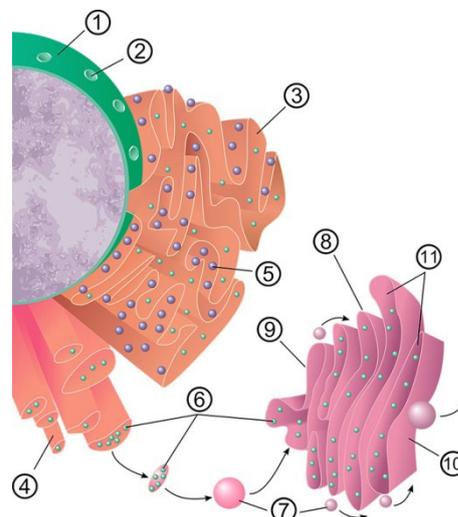


Abb. 1.6: Endoplasmatisches Retikulum und Golgi Apparat

(1) Kernmembran; (2) Kernpore; (3) Raus ER; (4) Glattes ER; (5) Ribosom auf dem rauhen ER; (6) Proteine, die transportiert werden; (7) Transport-Vesikel; (8) Golgi-Apparat; (9) cis-Seite des Golgi-Apparates; (10) trans-Seite des Golgi-Apparates; (11) Zisternen des Golgi-Apparates.

Bild: Manske, 2009

(F) Golgi-Apparat

Der Golgi-Apparat wird von vielen membranumgebenen Zisternen gebildet (siehe Abb. 1.6: [11]), die wie bei einem Stapel Teller aufeinanderliegen (oder nebeneinanderstehen, je nach Blickrichtung). Eine Zisterne wird Dictyosom genannt. Die Anzahl der Dictyosomen und der Stapel ist vom Zelltyp

(Aufgabe der Zelle) abhängig. Der Golgi-Apparat hat eine dem ER gegenüberliegende Seite – *cis*-Seite – und eine dem ER abgewandte Seite – *trans*-Seite – (siehe Abb. 1.6: [9] und [10]).

Über die Membran der *cis*-Seite gelangen, transportiert mit Vesikeln, Proteine, Polypeptide und Membranfragmente aus dem ER in den Golgi-Apparat. Danach werden die Stoffe über Vesikel von Dictyosom zu Dictyosom weitertransportiert und in diesen modifiziert. Am Ende gelangen die Stoffe über die *trans*-Seite mithilfe eines Vesikels zur Zellmembran oder zu den Zellorganellen.

Zusammengefasst beinhaltet die Aufgabe des Golgi-Apparats drei Bereiche: Speichern von Stoffen aus dem ER, Umwandeln von Stoffen aus dem ER, Weiterbefördern der Stoffe.

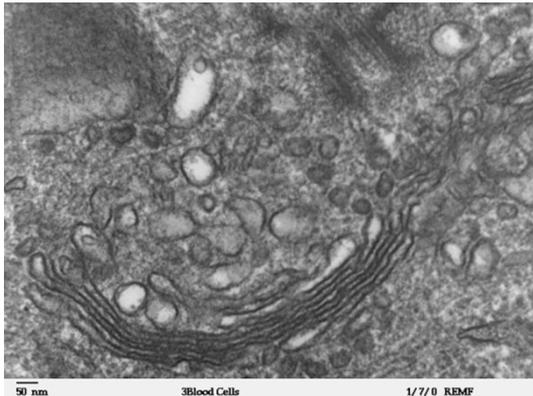


Abb. 1.7: Golgi-Apparat in Leukocyt

Bild: Howard, 2006

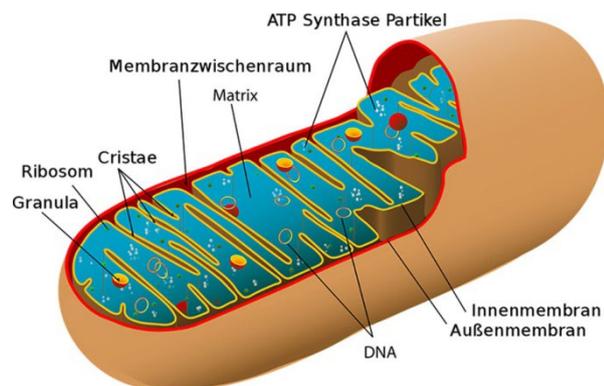


Abb. 1.8: Mitochondrium

Bild: LadyofHats, 2007

(G) Mitochondrien

Mitochondrien sind Zellorganellen, die für die ATP-Gewinnung beim Stoffwechsel von großer Bedeutung für die Zelle sind. Ohne Mitochondrien wäre die ATP-Ausbeute sehr gering. Ein Mitochondrium ist von zwei unterschiedlichen Zellmembranen (innere und äußere Membran) umgeben. Beide Membranen ermöglichen die Funktion der Mitochondrien und lassen aber auch Schlüsse auf die Ursprünge der Mitochondrien zu. Man geht davon aus, dass Mitochondrien früher eigenständige Lebewesen waren, die im Laufe der Evolution von den Eukaryoten aufgenommen wurden (siehe Endosymbiontentheorie).

Ein Mitochondrium ist aus zwei Räumen aufgebaut, die durch die beiden Membrane erzeugt werden. Im Inneren befindet sich, umgeben von der inneren Membran, ein großer Raum, die Matrix. Zwischen der inneren und äußeren Membran ist der Intermembranraum. In der Matrix ist eine Lösung enthalten, in der sich viele Enzyme befinden (z. B. Enzyme für die Oxidation von Pyruvat und Fettsäuren). Die innere Membran ist stark gefaltet (Oberflächenvergrößerung) und bildet hierdurch sogenannte Cristae (siehe Abb. 1.8). An der inneren Membran sind die Proteine der Atmungskette eingelagert (Komplex I: NADH-Hydrogenase; Q: Ubichinon; Komplex III: Cytochrom-b-c₁-Komplex; Cyt c: Cytochrom c; Komplex IV: Cytochrom-Oxidase-Komplex). Während des Elektronentransports entlang der Proteine der Atmungskette werden Wasserstoffprotonen (H⁺) aus der Matrix in den Intermembranraum gepumpt. Die Elektronen stammen von den im Stoffwechsel oxidierten Nährstoffen und werden über Elektronen- und Wasserstofftransporteure (NAD⁺/NADH) an die Membran gebracht. Durch das Pumpen über die Proteine der Atmungskette wird ein Konzentrationsgefälle bezüglich H⁺ zwischen Intermembranraum und Matrix aufgebaut. Strömen nun, angetrieben durch das Konzentrationsgefälle, Wasserstoffprotonen durch die ATP-Synthase (Protein an der inneren Membran) zurück in die Matrix, wird aus ADP und P_i ATP hergestellt. (In Abb. 1.2: [9])

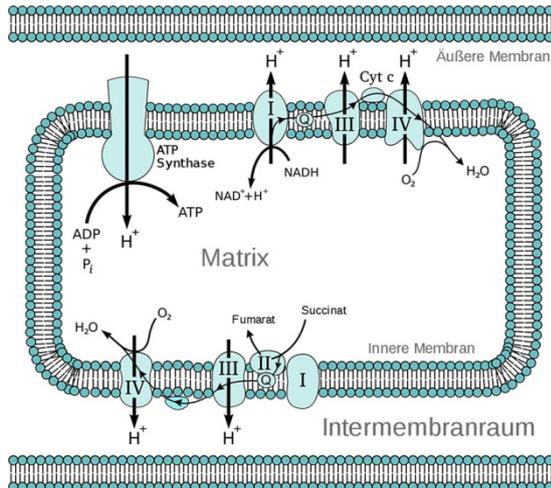


Abb. 1.9: Inneren Mitochondrienmembran

- (I) NADH-Hydrogenase
- (II) Ubichinon-Oxidoreduktase
- (Q) Ubichinon
- (III) Cytochrom-b-c₁-Komplex
- (Cyt c) Cytochrom c
- (IV) Cytochrom-Oxidase-Komplex

Bild: Hoffmeier, 2007, verändert

Endosymbiontentheorie

Laut der Endosymbiontentheorie haben im Verlauf der Evolution einzellige Vorformen der Eukaryoten andere Einzeller über Phagozytose aufgenommen, diese aber nicht verdaut. Die Eukaryoten gingen eine Symbiose mit den aufgenommenen Einzellern ein. Die aufgenommenen Einzeller wurden zu Organellen der Eukaryoten. Bei den Organellen handelt es sich, so die These, um Chloroplasten und Mitochondrien. Die Hypothese der Endosymbionten wurde von A. F. W. Schimper 1883 aufgestellt und konnte mittlerweile zu einer Theorie ausgebaut werden.

Gesichtspunkte, die die Theorie belegen:

- Mitochondrien und Chloroplasten haben zwei umschließende Membranen. Die zwei Membranen kamen, so die These, durch die Endocytose zustande: Die innere Membran stammt vom Organell selbst und die äußere Membran vom Endocytosebläschen.
- Mitochondrien und Chloroplasten können sich selbst vervielfältigen (Teilung) und werden bei der Befruchtung maternal (über die Eizelle) weitergegeben.
- Mitochondrien und Chloroplasten enthalten ihre eigene DNA (fadenförmige DNA).

(H) Cytoskelett

Das Cytoskelett ist ein Netzwerk aus Proteinfilamenten, die zur Stabilisierung, Befestigung von Zellorganellen, aktiven Bewegung und zum Transport von Vesikeln in der Zelle benötigt werden.

Man kann drei Proteinfilamenttypen unterscheiden: Intermediärfilamente, Mikrotubuli und Actinfilamente.

Intermediärfilamente: Diese Proteine haben eine hohe Zugfestigkeit und verhindern ein Auseinanderreißen der Zelle bei Dehnung. Die Intermediärfilamente bilden ein Netzwerk um den Zellkern und sind an der Zellmembran mit den Desmosomen (siehe Zellverbindungen) verankert.

Mikrotubuli: Mikrotubuli sind lange, steife Proteinröhren, die immer wieder zerfallen und neu aufgebaut werden. Die Mikrotubuli verlaufen vom Centrosom (Region/Zellkörper im Cytoplasma, welche/s in der Nähe des Zellkerns liegt) hin zur Zellmembran, sie bilden ein Schienennetz. An den Mikrotubuli werden die Vesikel von Motorproteinen entlanggezogen. Motorproteine sind Kinesine (transportie-

ren Vesikel Richtung Zellmembran) und Dyneine (transportieren Vesikel von der Membran ins Zellinnere). An den Mikrotubuli sind auch Zellorganellen befestigt. Die Mikrotubuli haben somit eine stützende, verankernde und transportierende Funktion.

Actinfilamente: Die Actinfilamente in der Zelle ermöglichen Formänderungen und Zellbewegungen (siehe Kapitel 5 Lokomotion).

(I) Lysosomen

Lysosomen sind Membranbläschen (Vesikel) für die Verdauung von Fremdkörpern oder abgestorbene Zellorganellen in der Zelle. Ein Lysosom enthält Verdauungsenzyme und hat einen sauren pH-Wert. Die Lysosomen werden im Golgi-Apparat gebildet und verschmelzen nach der Phagozytose mit dem Membranbläschen, das durch die Phagozytose entstanden ist. Auch die Apoptose (programmierter Zelltod) erfolgt durch Lysosom-Enzyme. (In Abb. 1.2: [10])

(J) Peroxisomen

Peroxisomen sind Vesikel, die unterschiedlichste Moleküle abbauen (z. B. Ethanol oder Fettsäuren zu Acetyl-CoA). (In Abb. 1.2: [12])

(K) Zellverbindungen

Die Zellen eines Organismus können zu Funktionseinheiten miteinander über Zellverbindungen verbunden sein oder sich hingegen frei bewegend im Organismus befinden. Bei den Zellverbindungen kann man drei Arten unterscheiden: Desmosomen, Gap junctions und Tight junctions. Zellverbindungen ermöglichen die Verankerung und die Kommunikation von Zellen untereinander.

Desmosomen: Zellstrukturen in der Zellmembran, die Zellen miteinander verbinden, um ein Auseinanderreißen zu verhindern. Desmosomen finden sich bei Zellen mit hoher mechanischer Belastung (z. B. Epithelzellen). An unterschiedlichen Stellen sind Scheiben ausgebildet, von denen ins Innere Keratinfilamente, die mit dem Cytoskelett in Verbindung stehen, und von denen nach außen Cadherine (Glycoproteine) abgehen, die mit den Cadherinen der anliegenden Zelle verbunden sind.

Gap junctions: Gap junctions sind feine Kanäle, die einen Austausch von Stoffen (Nährstoffe, Ionen) aus dem Cytoplasma der einen Zelle ins Cytoplasma der anderen Zelle ermöglichen. Gap junctions finden sich z. B. in den Glanzstreifen der Herzmuskulatur von Wirbeltieren. An den Glanzstreifen wird Na^+ übertragen und dadurch die benachbarte Herzmuskelzelle zur Kontraktion (Aktionspotenzial) animiert (siehe Kapitel 2 Kreislaufsystem und Blut).

Tight junctions: Desmosomen oder Gap junctions verbinden die aneinander anliegenden Zellen nicht dicht, es können Stoffe zwischen den beiden Membranen hindurchfließen. Tight junctions bestehen aus Bändern von Membranproteinen, die die Zwischenräume zwischen zwei Zellen komplett verschließen und dadurch verhindern, dass Stoffe durch die Zellräume strömen können (Diffusionsbarriere). Tight junctions finden sich z. B. bei Epithelzellen (Nieren-, Darmepithel).

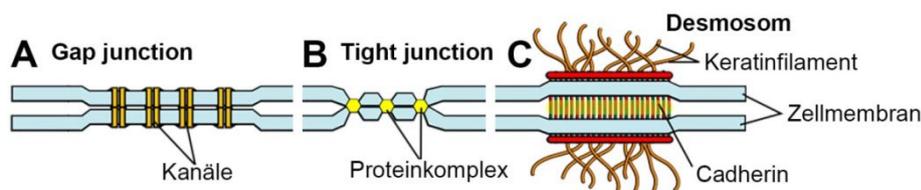


Abb. 1.10: Zellverbindungen

Bild: LadyofHats, 2006, verändert

(L) Zellmembran

Die Zellmembran umschließt die Zelle. Sie hat die Funktion, das Cytosol von der extrazellulären Flüssigkeit abzugrenzen und den Transport von Molekülen in und aus der Zelle zu kontrollieren.

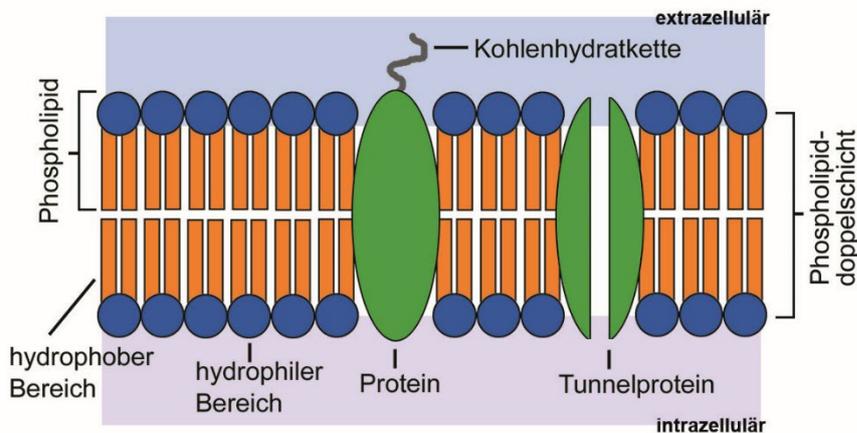
**Abb. 1.11: Zellmembran**

Bild: Baur, 2015, verändert

(M) Cytosol

Das Cytosol ist eine wässrige Lösung, die das Innere der Zelle füllt. Eigentlich werden die Begriffe Cytosol und Cytoplasma voneinander abgegrenzt. Das Cytoplasma ist das gesamte Innere der Zelle = Cytosol, Cytoskelett und Zellorganellen. Je nach Literatur werden Cytosol und Cytoplasma jedoch als Synonyme verwendet.

1.3 Transportvorgänge in die Zelle und aus der Zelle

Einfache Diffusion: Bei der Diffusion führt die Eigenbewegung der Teilchen (Brown-Molekularbewegung) nach und nach zu einem Konzentrationsausgleich. Die Diffusion findet immer entlang des Konzentrationsgefälles von der höheren hin zur niedrigeren Konzentration statt.

Osmose: Osmose ist eine Diffusion durch eine semipermeable Membran. Bei der Diffusion wandern die Teilchen, die die Membran passieren können, zu den Teilchen, die dies nicht können. Dies erfolgt so lange, bis die Konzentration („Mischung“ der Teilchen) ausgeglichen ist.

Erleichterte Diffusion: Kann ein Stoff aufgrund seiner Größe oder Beschaffenheit nicht durch die Zellmembran diffundieren, kann dieser durch ein spezielles Protein (Tunnelprotein; Synonym: Kanal) gelangen. Dieses lässt spezifisch Teilchen durch sich selbst hindurch (= passiver Transport). Außer den Tunnelproteinen gibt es auch Carrierproteine, die ohne ATP arbeiten und Stoffe durch Konformationsveränderung transportieren. Transportproteine sind stoffspezifisch.

Aktiver Transport: Ein aktiver Transport ist ein Transport mithilfe von Pumpen (spezielle Proteine der Membran = Carrier) entgegen dem Konzentrationsgefälle unter Aufwendung von Energie. Beim aktiven Transport kann man zwischen primär aktivem und sekundär aktivem Transport unterscheiden.

Primär aktiver Transport: Transport über Carrier, die unter ATP-Aufwand Teilchen durch die Zellmembran entgegen ihrem Konzentrationsgefälle transportieren.

Sekundär aktiver Transport: Beim sekundären aktiven Transport wird die Energie, die durch die Wanderung eines Teilchens in Richtung des Konzentrationsgefälles frei wird, eingesetzt, um ein anderes Teilchen gegen das Konzentrationsgefälle zu transportieren. Der sekundär aktive Transport erfolgt meist durch Pumpen (energiegesteuerte Carrier), die unter Einsatz von ATP für ein Konzentrationsgefälle sorgen, sodass Stoffe bestrebt sind, in die Zelle zurück-

zuwandern, um die Konzentration auszugleichen, und hierbei andere Teilchen mitnehmen (Cotransport eines Carriers).

Endo-/Exocytose: Über die Endocytose gelangt eine Substanz von außen über die Zellmembran ins Innere der Zelle. Hierbei stülpt sich die Membran ein (in die Zelle hinein) und umschließt die Substanz. Es entsteht ein Vesikel, das sich von der Membran löst und ins Cytoplasma gelangt. Die aufgenommene Substanz ist durch das Membranbläschen vom Rest des Cytosols abgetrennt. Die Exocytose funktioniert im Vergleich zur Endocytose genau umgekehrt.

Phagocytose: Endocytose eines festen Teilchens (bei Einzellern meist kleine lebende Organismen).

Pinocytose: Endocytose von Flüssigkeiten.



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

aktiver Transport	Exocytose	Phospholipiddoppelschicht
Carrier	Gap junction	Prokaryot
Desmosom	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? [●]

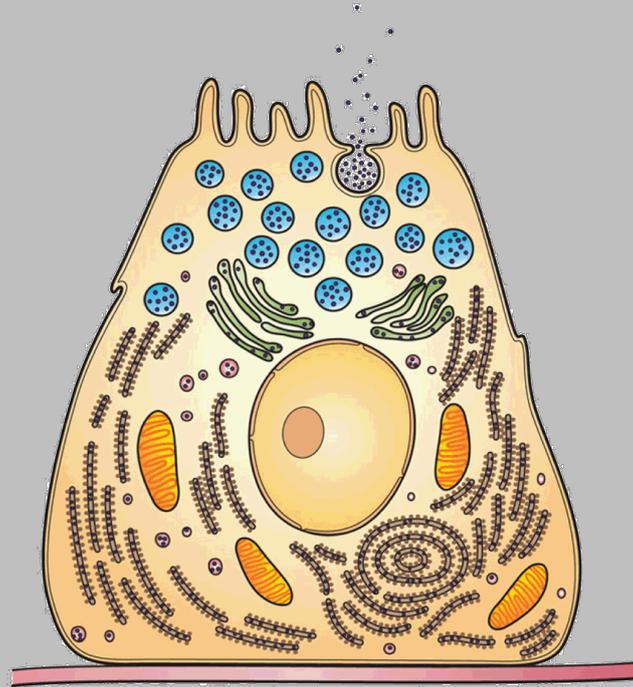


Abb. 1.12: Drüsenzelle

Bild: Fischer, 2013

Literatur

- Alberts, B., Bray, D., Hopkin, K., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K. & Walter, P. (2014). *Lehrbuch der Molekularen Zellbiologie* (4. Auflage. Übersetzung herausgegeben von Jochen Graw). Weinheim: Wiley-VCH.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K. & Walter, P. (2017). *Molekularbiologie der Zelle* (6. Auflage. Übersetzung herausgegeben von Ulrich Schäfer). Weinheim: Wiley-VCH.
- 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.
- Goodsell, D. S. (2010). *Wie Zellen funktionieren: Wirtschaft und Produktion in der molekularen Welt* (2. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Pollard, T. D., Earnshaw, W. C., Lippincott-Schwartz, J. & Johnson, G. (2017). *Cell biology* (Third edition). Philadelphia, PA: Elsevier.
- Sadava, D. E., Hillis, D. M., Heller, H. C. & Berenbaum, M. (2011). *Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Abbildungen

Abbildung 1.1: **Lymphocyt**. Ursprünglicher Bildtitel: Electron microscopic image of a single human lymphocyte; Bild von: Triche, National Cancer Institute; 1976; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEM_Lymphocyte.jpg

Abbildung 1.2: **Aufbau tierische Zelle**. Bild von: MesserWoland & Szczepan; 2006; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Biological_cell.svg

Abbildung 1.3: **Nucleus**. Ursprünglicher Bildtitel: Diagram human cell nucleus; Bild von: Mariana Ruiz; 2006; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_human_cell_nucleus.svg

Abbildung 1.4: **Bildung eines Vesikels und Exocytose**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 1.5: **Kernmembran**. Ursprünglicher Bildtitel: Kernmembran; Bild von: Peter Wolber; 2005; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernmembran.png>

Abbildung 1.6: **Endoplasmatisches Retikulum und Golgi-Apparat**. Ursprünglicher Bildtitel: Nucleus ER Golgi; Bild von: Magnus Manske; 2009; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleus_ER_golgi.svg

Abbildung 1.7: **Golgi-Apparat in Leukocyt**. Ursprünglicher Bildtitel: High magnification transmission electron microscope image of a human leukocyte, showing golgi, which is a structure involved in protein transport in the cytoplasma of the cell; Bild von: Louisa Howard; 2006; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_leukocyte_showing_golgi_-_TEM.jpg

Abbildung 1.8: **Mitochondrium**. Ursprünglicher Bildtitel: Mitochondrion; Bild von: LadyofHats; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animal_mitochondrion_diagram_de.svg

Abbildung 1.9: **Mitochondrienmembran**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung der mitochondrialen Elektronentransportkette; Bild von: Klaus Hoffmeier; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mitochondriale_Elektronentransportkette.svg; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 1.10: **Zellverbindungen**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung verschiedener Zellkontakte; Bild von: LadyofHats; 2006; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Zellkontakt#/media/Datei:Cell_junction_simplified_en.svg; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 1.11: **Zellmembran**. Bild aus: Baur, Armin (2015): Humanbiologie für Lehramtsstudierende. Ein Arbeits- und Studienbuch. Berlin: Springer Spektrum; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 1.12: **Drüsenzelle**. Bild von: Holly Fischer; 2013; Lizenz: CC BY 3.0, verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Glands?uselang=de#/media/File:Organelles_of_the_Secretory_Pathway.png

2. Kreislaufsysteme und „Blut“

Im Gegensatz zu den einzelligen tierischen Organismen und ein paar wenigen tierischen Vielzellern benötigen die meisten Metazoen (tierische Vielzeller) ein Herz oder eine ähnliche Funktionseinheit, die eine Flüssigkeit in Bewegung setzt und diese durch den Körper treibt. Bei der Flüssigkeit kann es sich um Blut oder Hämolymphe handeln (daher wurde in der Überschrift der Begriff Blut in Anführungszeichen gesetzt). Der Unterschied der beiden Flüssigkeiten wird im Text beschrieben.

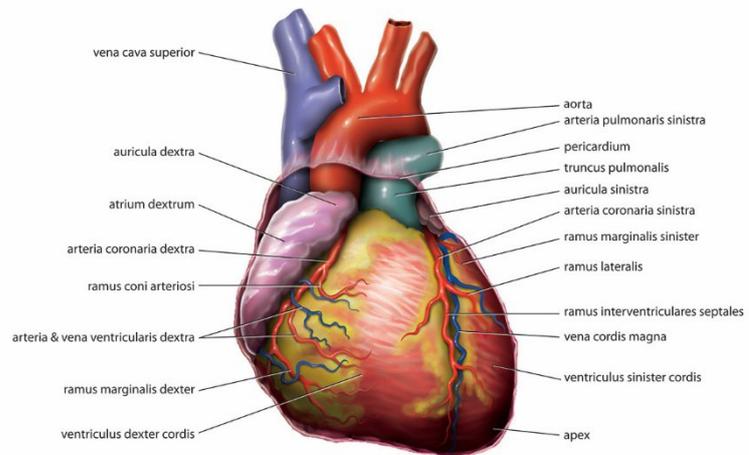


Abb. 2.1: Menschliches Herz

Bild: Tvanbr, 2010

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die Aufgaben eines Kreislaufsystems erklären,
 - die unterschiedlichen Kreislaufsysteme benennen,
 - die Funktionsweisen der Kreislaufsysteme erläutern,
 - die Zusammensetzung von Blut und Hämolymphe erklären,
 - die Funktionen von Blut und Hämolymphe erklären.

2.1 Aufgaben eines Kreislaufsystems

Die Aufgaben eines Kreislaufsystems sind sehr eng mit den Aufgaben von Blut und Hämolymphe verbunden. Daher werden die Aufgaben der Kreislaufsystems auch bei den Aufgaben von Blut und Hämolymphe erneut aufgeführt.

Über das Kreislaufsystem werden unterschiedliche Stoffe im Körper befördert. Sauerstoff (O_2) wird über das Kreislaufsystem vom Atmungsorgan zu den Zellen und Kohlenstoffdioxid (CO_2) von den Zellen zum Atmungsorgan transportiert. Die Nährstoffe werden aus dem Darm zu den Zellen bzw. zuerst zu speziellen Organen (z. B. der Leber) befördert. Über den Kreislauf werden Hormone (chemische Botenstoffe) im Körper verteilt. Aus dem Körper werden Abfallstoffe (Giftstoffe, Stickstoffverbindungen) zum Ausscheidungsorgan transportiert.

Zusammengefasst ist die eigentliche Funktion des Kreislaufs die Aufrechterhaltung eines geleiteten Flüssigkeitsstroms (angetrieben mithilfe eines Herzens), über den die Transportaufgabe erfolgen kann.

2.2 Kreislaufsysteme

Nachfolgend werden die Kreislaufsysteme der Tiere – der tierischen Einzeller (*Protozoa*) und tierischen Vielzeller (*Metazoa*) –, in vier Einordnungen unterteilt, aufgeführt.

2.2.1 Kein System für die Kreislaftätigkeit

Einzeller und Schwämme (*Porifera*) nehmen alle ihre benötigten Stoffe direkt aus dem Außenmedium über die Zellmembran auf – Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid über Diffusion und Nährstoffe über Phagocytose. Abfallstoffe werden ebenfalls direkt über die Zellmembran wieder in das umgebende Medium abgegeben. Bei den Schwämmen, als einfache Vielzeller, erfolgt der Austausch von Stoffen auch von Zelle zu Zelle.

2.2.2 Gastrovaskularsystem

Als Gastrovaskularsystem wird ein System bestehend aus einer Leibeshöhle (auch Gastrovaskularraum oder Gastralraum) bezeichnet, das zur Verdauung und Verteilung der Nährstoffe dient. Die Flüssigkeit in der Leibeshöhle wird von begeißelten Zellen des inneren Epithels (inneres Deckgewebe) der Leibeshöhle in Strömung versetzt. Tiere mit einem Gastrovaskularsystem besitzen eine Körperöffnung, die von außen in die Leibeshöhle führt. Diese Öffnung ist Mund und After zugleich. Ein Gastrovaskularsystem findet man bei Nesseltieren (*Cnidaria*: z. B. Quallen und Süßwasserpolypen) und bei den Plattwürmern (*Plathelminthes*: z. B. Planarien, siehe Abb. 2.2). Das Gastrovaskularsystem ist eigentlich kein echtes Kreislaufsystem, sondern ein durch den Körper ziehendes, verzweigtes Darmsystem, das die Nährstoffe verteilt und so zusätzlich die Funktion eines Blutgefäßsystems übernimmt.

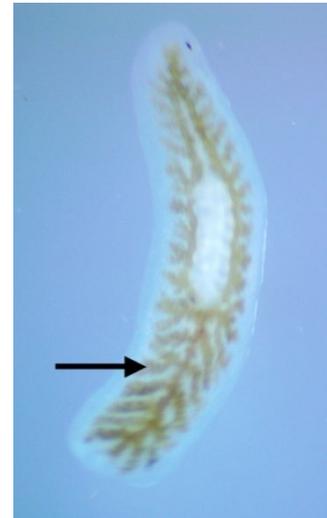


Abb. 2.2: Gastrovaskularsystem
Pfeil zeigt auf Gastrovaskularraum (Gesamtheit der gelb-bräunlichen Struktur)
Dendrocoelum lacteum (Milchweiße Planarie) aus Teich des Ökogartens

Bild: Baur, 2019

2.2.3 Kardiovaskuläre Systeme

Die kardiovaskulären Systeme sind echte Kreislaufsysteme, d. h. sie bestehen aus den Bestandteilen Herz, Blut oder Hämolymphe und Gefäße. Bei den kardiovaskulären Systemen kann zwischen offenen und geschlossenen Kreislaufsystemen unterschieden werden.

(A) Offenes Kreislaufsystem

Ein offenes Kreislaufsystem besteht aus einem Herz und einigen abgehenden Gefäßen. Die Gefäße münden offen in die Leibeshöhle (sie führen nicht zum Herzen zurück). Das Herz saugt über Ostien (Öffnungen mit Klappen) oder über eine Öffnungsseite des Herzens Hämolymphe (Körperflüssigkeit, die auch als Blut fungiert) direkt aus der Leibeshöhle ein und pumpt diese über offen in die Leibeshöhle mündende Gefäße zurück in die Leibeshöhle – dies führt zu einer Zirkulation der Hämolymphe. Beim Pumpvorgang verschließen sich die Ostien und öffnen sich beim Saugvorgang des Herzens wieder. Durch die Zirkulation werden Nährstoffe und z. T. auch Sauerstoff im Körper verteilt und zu den Zellen transportiert. Abfallstoffe gelangen hierdurch ebenfalls zu den Exkretionsorganen.

Ein offenes Kreislaufsystem findet man beispielsweise beim Stamm der Gliederfüßer (*Arthropoda*, z. B. Insekten und Spinnen) oder Weichtiere (*Mollusca*, z. B. Schnecken, Muscheln und Kopffüßer).

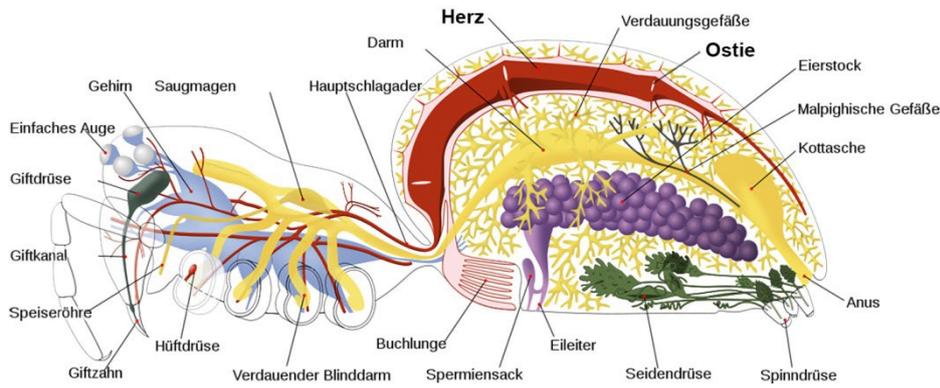


Abb. 2.3: Offenes Kreislaufsystem bei einer Webspinne

Bild: Comstock, 2010

(B) Geschlossenes Kreislaufsystem

Ein geschlossenes Kreislaufsystem ist ein Kreislaufsystem, das aus einem Herz (oder einem funktional ähnlichen Organ; bei Regenwürmern die Lateralgefäße) und einem geschlossenen Gefäßsystem besteht. Über die Gefäße wird das Blut in den Körper und zurück zum Herzen transportieren. Das Blut und die Körperflüssigkeit unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung (was ein Unterschied zur Hämolymphe ist).

Ein geschlossenes Kreislaufsystem findet man bei den Taxa Wirbeltiere (*Vertebrata*) oder Ringelwürmer (*Annelida*: z. B. Regenwurm).

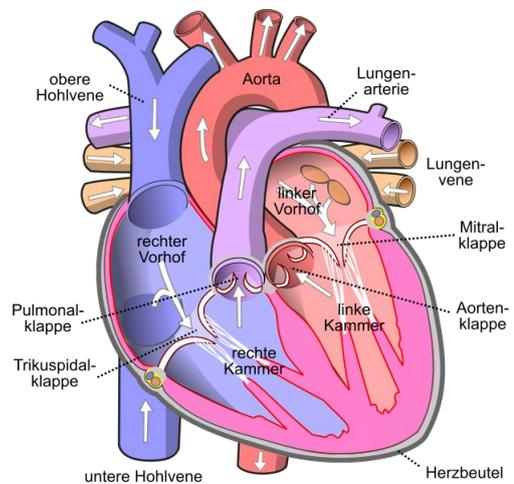


Abb. 2.4: Herz Säugetier

Bild: Jakov, 2010

Das Herz der Wirbeltiere ist trotz vieler Ähnlichkeiten in seinem groben Bau unterschiedlich gestaltet, was beispielsweise aus der Anzahl von Vorhöfen (Atrien) und Herzkammern (Ventrikeln) ersichtlich ist. Die Anzahl der Vorhöfe und Herzkammern hängt eng mit dem Aufbau des Kreislaufsystems zusammen. So unterscheiden sich die Kreislaufsysteme der Fische (Herz: ein Vorhof, eine Kammer), der Amphibien (Herz: zwei Vorhöfe, eine Kammer), der Reptilien (Herz: zwei Vorhöfe, zwei Kammern, teilweise durch Herzscheidewand getrennt), der Vögel (Herz: zwei Vorhöfe, zwei Kammern) und Säugtiere (Herz: zwei Vorhöfe, zwei Kammern) voneinander.

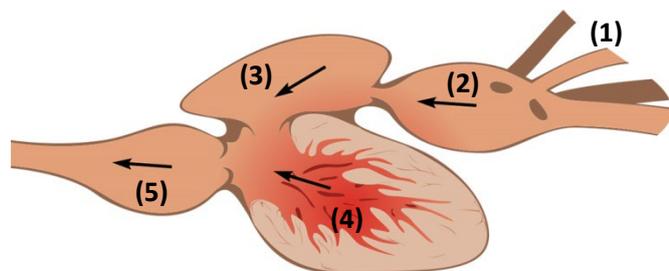


Abb. 2.5: Herz Fisch

Das zweikammerige (vierteilige) Herz der Fische. Das Vorderende des Tieres liegt links; rechts sind die Enden einiger zuführender Venen eingezeichnet (1). Es folgen der *Sinus venosus* (2), der Vorhof (3), der Ventrikel (4) und je nach Art der *Bulbus arteriosus* oder der *Conus arteriosus* (5).

Bild: Ahnode, 2019

Die Herzmuskelzellen der Wirbeltiere sind quergestreifte und verzweigte Muskelzellen, die über Glanzstreifen (Intercalarscheiben) miteinander verbunden sind. Die Glanzstreifen bestehen aus Gap junctions und Desmosomen. Die Gap junctions sind zur Weiterleitung von Ionen bei der Aktivierung der Herzmuskelzelle notwendig und die Desmosomen zur Stabilisierung des Zellver-

bandes. Die Stabilisierung ist bei dem auftretenden Druck (Füllungsphase) und dem entstehenden Zug (Austreibungsphase) notwendig.

Die mechanische Arbeit des Wirbeltierherzens kann grob in zwei Phasen unterteilt werden: in die Diastole und in die Systole. Beide Phasen sollen an zwei Vertretern erläutert werden.

Diastole (Füllungsphase der Kammer):

Bei Knochenfischen (*Chondrichthyes*): Der Vorhof ist mit Blut gefüllt. Die Klappe zur Herzkammer öffnet sich und die Vorhofmuskulatur kontrahiert sich. Zudem herrscht ein Unterdruck in der Herzkammer. Das Blut fließt aus dem Vorhof in die Herzkammer.

Bei Säugetieren (*Mammalia*): Die beiden Vorhöfe sind mit Blut gefüllt. Die Herzkammermuskulatur (Kammermyokard) erschlafft, hierdurch öffnen sich die Segelklappen auf beiden Seiten des Herzens. Die Vorhöfe kontrahieren sich und das Blut aus den Vorhöfen strömt in die Herzkammer.

Systole (Austreibungsphase):

Bei Knochenfischen: Die Herzkammer kontrahiert sich und presst das Blut durch Klappen (Taschenklappen) in den Bulbus arteriosus bzw. in den Conus arteriosus, der sich ausdehnt und mithilfe von elastischen Fasern nach der Austreibungsphase des Herzens sich langsam und gleichbleibend zusammenzieht und das Blut durch die Kiemenkapillaren treibt. In der Austreibungsphase füllt sich der Vorhof mit dem Blut, das sich im Sinus venosus gesammelt hat. Der Sinus venosus ermöglicht eine gleichbleibende Blutmenge, die in den Vorhof fließen kann. Der Kreislauf der Fische ist ein einfacher Kreislauf. Das fließende Blut muss zwei Kapillarsysteme durchströmen, was dazu führt, dass es mit wenig Druck durch das Kreislaufsystem fließt.

Bei Säugetieren: Die Herzkammermuskulatur beider Herzkammern kontrahiert sich simultan, hierdurch schließen sich die Segelklappen. Der Druck in der Herzkammer steigt an. Wird der Druck, der in der Aorta und Lungenarterie herrscht, überstiegen, öffnen sich die Taschenklappen. Der hierfür nötige Druck beträgt beim Menschen in der rechten Herzkammer 20 mmHg und in der linken Herzkammer 120 mmHg. In der Austreibungsphase füllen sich die Vorhöfe wieder.

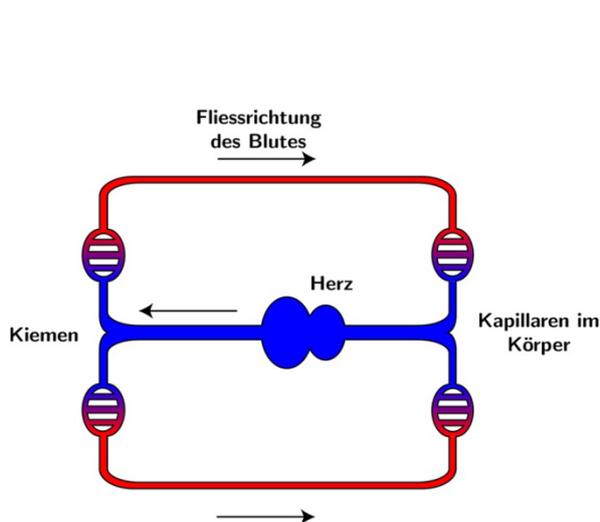


Abb. 2.6: Kreislauf Fische
rot: sauerstoffreiches Blut;
blau: sauerstoffarmes Blut

Bild: Lennert B., 2005

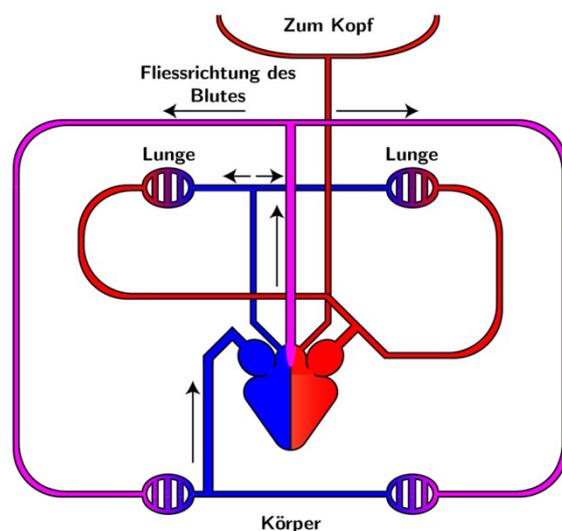


Abb. 2.7: Kreislauf Reptilien
rot: sauerstoffreiches Blut; blau: sauerstoffarmes Blut; Pink: Mischblut

Bild: Lennert B., 2005

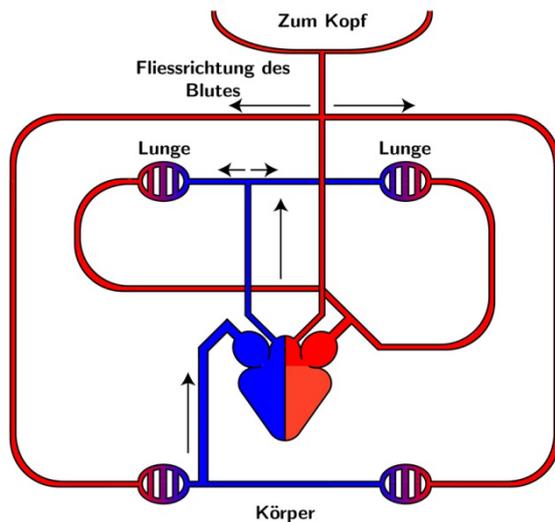


Abb. 2.8: Kreislauf Säugetier

rot: sauerstoffreiches Blut;
blau: sauerstoffarmes Blut

Bild: Lennert B., 2005

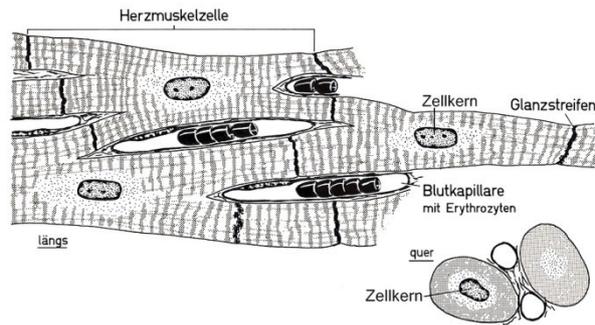


Abb. 2.9: Glanzstreifen Herzmuskelzellen der Wirbeltiere

Bild: Rollroter, 2014

Auch bei einem geschlossenen Kreislaufsystem ist es notwendig, dass die Flüssigkeit, die sich um die Körperzellen befindet (interstitielle Flüssigkeit), in Bewegung kommt und Stoffe in dieser Flüssigkeit immer wieder ausgetauscht und die Flüssigkeit gereinigt werden. Die interstitielle Flüssigkeit ist in ihrer Zusammensetzung von der intrazellulären Flüssigkeit (Cytoplasma) und dem Blut verschieden. In den engen Kapillaren der Wirbeltiere kommt es durch den hohen Druck und durch vorhandene Poren zur Filtration des Blutes. Durch die Filtration wird Flüssigkeit und in dieser durch die Poren passende Moleküle ins Interstitium (interstitieller Raum) abgegeben. Das Filtrat heißt Lymphe und ist der interstitiellen Flüssigkeit in ihrer Zusammensetzung sehr ähnlich. Über die Lymphe werden Nährstoffe, Zellen und kleine Proteine ins Bindegewebe transportiert. Erythrozyten und große Proteine verbleiben im Blut (die Poren sind für sie zu klein). Die im Blutsystem verbleibenden Makromoleküle (Erythrozyten und Proteine) erzeugen einen hohen osmotischen Druck (kolloidosmotischer Druck). Dieser führt in den Kapillarabschnitten nahe der Venolen zu einer Reabsorption von interstitieller Flüssigkeit, die in ihrer Menge aber nicht der Menge der filtrierten Lymphe entspricht. Ein gewisser Anteil verbleibt im Interstitium und wird über das Lymphsystem in den Kreislauf zurücktransportiert. Zwischen den Gefäßen des Lymphsystems befinden sich Lymphknoten. In den Lymphknoten wird die Lymphe gereinigt. Der Transport der Lymphe verläuft, wie bei den Venen, mithilfe von Klappen, die den Rückfluss verhindern. Die Lymphgefäße werden aufgrund von Bewegungen des Körpers und anliegenden Arterien zusammengedrückt. Durch die Kontraktion wird die Lymphe von Klappe zu Klappe gedrückt.

Lymphkapillaren im Gewebszwischenraum

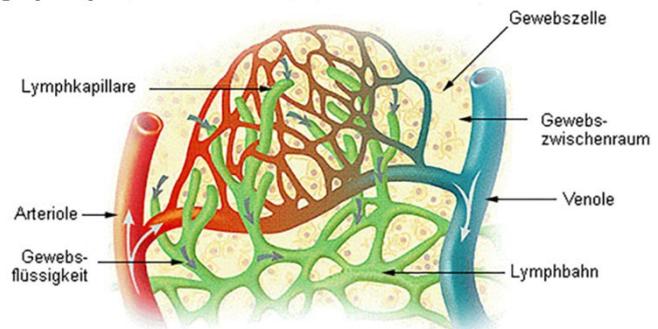


Abb. 2.10: Lymphkapillaren im Gewebe

Bild: SEER, o. J.

Zusätzlich sorgt eine rhythmische Kontraktion der glatten Muskulatur in den Lymphgefäßen für den Rücktransport.

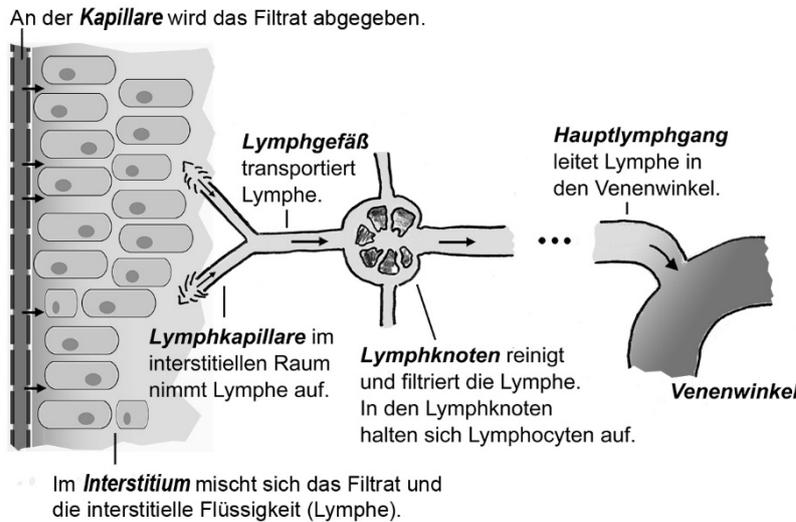


Abb. 2.11: Lymphsystem Schema

Bild: Baur, 2020

2.3 Herz-Reizleitung

Das Herz der Wirbeltiere und mancher anderer Tiergruppen hat ein autonomes Erregungssystem. Man weiß durch Untersuchungen bei Amphibien (Fröschen), dass das Herz auch noch eine gewisse Zeit schlagen kann, wenn es aus dem Körper entnommen und mit Nährstoffen versorgt wird. Bei den Amnioten (Reptilien, Vögel, Säugetiere) wird die Herzerregung zusätzlich durch das autonome Nervensystem, manche Hormone und die Temperatur beeinflusst.

Bei den Wirbeltieren gibt der Sinusknoten eine Frequenz vor, die in Form von elektrischen Impulsen über die Herzmuskulatur der Vorhöfe weitergeleitet wird und diese zur Kontraktion animiert. Die Erregungsimpulse gelangen über die Vorhofmuskulatur zum AV-Knoten, der zwischen den Vorhöfen und den Herzkammern liegt. Vom AV-Knoten gelangt der Impuls etwas zeitlich versetzt über das HIS-Bündel und die Tawaraschenkel zu den Purkinje-Fasern, die die Herzkammernmuskulatur von unten nach oben zur Kontraktion bringen. Die zeitliche Versetzung im AV-Knoten sorgt dafür, dass die Vorhöfe komplett kontrahiert sind, bevor die Herzkammern kontrahieren.

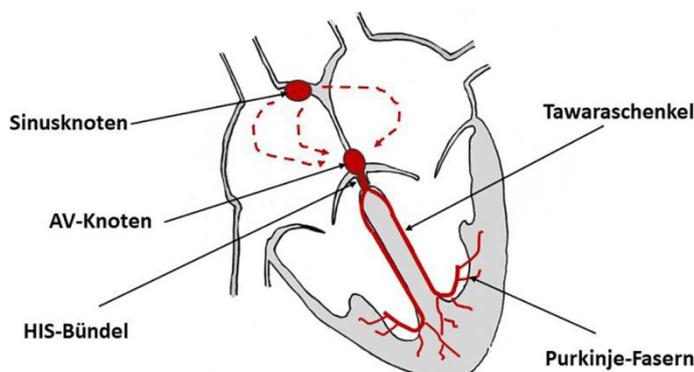


Abb. 2.12: Reizleitung Herz Säugetier

Bild: Baur, 2015

Die normale Frequenz (messbar am Puls) beim Menschen beträgt 60–80 Schläge pro Minute. Die Blutmenge, die in einer Minute vom Herz transportiert wird (Herzminutenvolumen) beträgt ca. 4,9 l (entspricht knapp 5 Tetrapak Milch).

Bei den Tunikaten (*Tunicata*: Manteltiere) kommt es zu einer Umkehr der Kontraktionsrichtung (Pumprichtung) des Herzens. Das Herz hat auf jeder Seite ein Erregungssystem. Tunikaten haben ein offenes Kreislaufsystem und das Herz pumpt eine Zeit lang Hämolymphe in den Kiemendarm. Der Kiemendarm ist u. a. das Atmungsorgan der Tunikaten. Nach dieser Zeitspanne erfolgt eine Schlagumkehrung und das Blut aus dem Kiemendarm wird zurück in die Körperhöhle des Tiers gepumpt, hier kommt es zum Gasaustausch und zur Aufnahme von Nährstoffen.



Abb. 2.13: Tunikaten Kolonie
Clavelina moluccensis

Bild: Nhobgood, 2005

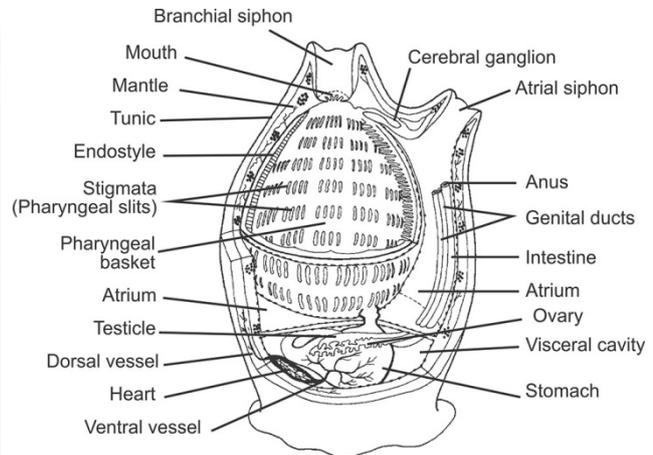


Abb. 2.14: Bau eines Tunikaten

Bild: Houseman, 2013

2.4 Unterschiede in der „Blutflüssigkeit“

Je nach Kreislaufsystem sind unterschiedliche ‚Blutflüssigkeiten‘ im Einsatz. Beim Gastrovaskularsystem gibt es kein Blut, aber im Interstitium gibt es extrazelluläre Flüssigkeit, die mit Proteinen, phagozytierenden Zellen (für die Immunreaktion) und bei manchen Tiergruppen Atmungspigmenten versehen ist. Im offene Kreislaufsystem kann man nicht zwischen ‚Blutflüssigkeit‘ und Lymphe unterscheiden, da beides ein und dasselbe ist. Die Lymphe wird daher als Hämolymphe bezeichnet. In ei-

Tabelle 2.1: Respiratorische Proteine	
Pigment	Vorkommen
Hämocyanin (kupferhaltiges Protein)	Weichtiere (<i>Mollusca</i>), Krebstiere (<i>Crustacea</i>), Spinnentiere (<i>Arachnida</i>)
Hämerythrin (eisenhaltiges Protein)	Vielborster (<i>Polychaeta</i>)
Chlorocruorin (Protein mit eisenhaltigem Porphyrinring)	Vielborster (<i>Polychaeta</i>), Einige Wenigborster (<i>Oligochaeta</i>)
Hämoglobin (Protein mit eisenhaltigem Porphyrinring)	Wirbeltiere (<i>Vertebrata</i>): fast alle, außer Aallarven und einigen antarktischen Fischen, Stachelhäuter (<i>Echinodermata</i>), Weichtiere (<i>Mollusca</i>), Insekten (<i>Insecta</i>), Krebstiere (<i>Crustacea</i>), Ringelwürmer (<i>Annelida</i>), Fadenwürmer (<i>Nematoda</i>), Plattwürmer (Plathelminthes), tierische Einzeller (Protozoen)

Aus: Lexikon Biologie Spektrum, 1999; verändert. Original Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/atmungspigmente/5864>; (abgerufen am: 24.10.2019)

nem geschlossenen Kreislaufsystem kann man Blut und Lymphe unterscheiden. Hier enthält das Blut Blutplasma und Blutzellen. Nicht bei allen Organismen sind die respiratorischen Proteine (Atmungs-

pigmente) in Blutzellen untergebracht. Bei manchen Arten schwimmen die respiratorischen Proteine (Proteinkomplexe) frei im Blut. Die respiratorischen Proteine haben die Fähigkeit, Sauerstoff reversibel zu binden und damit die schlechte Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser (Blutplasma) zu kompensieren.

2.5 Funktion Blut und Hämolymphe

(A) Transportfunktion

Über die Blutflüssigkeit werden viele unterschiedliche Stoffe transportiert:

- Atemgase: O_2 (an das respiratorische Protein gebunden), CO_2 (in Blutzellen an Blutzellen und als HCO_3^-)
- Nährstoffe: Kohlenhydrate, Proteine (Aminosäuren), Fette (in Transportproteinen), Vitamine, Spurenelemente (Elektrolyte)
- Hormone (chemische Botenstoffe)
- Ausscheidungsprodukte (Ammoniak, Harnstoff, Harnsäure)

(B) Teil des Immunsystems

In der Blutflüssigkeit sind zelluläre und humorale Bestandteile enthalten bzw. diese werden über die Flüssigkeit transportiert.

(C) Wundheilung

Bestandteile der Blutflüssigkeit sorgen für die Wundheilung.

(D) Wasser-Elektrolyt-Haushalt

Durch den osmotischen Druck ist die Blutflüssigkeit an der Regulation des Wasser-Elektrolyt-Haushalts beteiligt.

(E) Mitregulation Säure-Basen-Haushalt

Über die Blutflüssigkeit erfolgt eine (Mit-)Regulation des Säure-Basen-Gleichgewichts: Pufferfunktion durch HCO_3^- ; als Beispiel beträgt der pH-Wert des Blutes des Menschen 7,4.

(F) Wärmeregulation

Über das Wasser in der Blutflüssigkeit wird Wärme transportiert und gespeichert (ermöglicht durch Kapazität von Wasser, Wärmeenergie aufzunehmen). Wird viel Blutflüssigkeit in die Körperaußenbereiche geleitet, wird Wärme abgegeben, was zur Kühlung des Körpers führt. Wird wenig Blutflüssigkeit in die Körperperipherie geleitet, wird Wärme zurückgehalten.



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

Atmungspigment	Hämolymphe	Ostie
Diastole	interstitiell	Reabsorption
extrazellulär	intrazellulär	Reizleitungssystem Herz
Filtration	kardiovaskuläres System	respiratorisches Protein
Gastrovaskularraum	kolloidosmotischer Druck	Systole
Gastrovaskularsystem	Lymphpe	
Glanzstreifen	Lymphknoten	

Aufgabe 2:

- (1) Grenzen Sie Blut, Hämolymphe und Lymphe voneinander ab.
- (2) Vergleichen Sie die verschiedenen Kreislaufsysteme der Tiere untereinander. (Welche Bestandteile findet man immer bzw. bei einigen Arten, welche sind grundlegend unterschiedlich?)
- (3) Vergleichen Sie die Kreislaufsysteme und Herzen der Wirbeltiere.
- (4) Beschreiben Sie die Saug-Pump-Funktion eines Herzens in einem offenen Kreislaufsystem.
- (5) Beschreiben Sie die Saug-Pump-Funktion eines Herzens in einem geschlossenen Kreislaufsystem.
- (6) Informieren Sie sich in der Literatur über Hilfs Herzen (bzw. Nebenherzen): z. B. im Buch: Dettner, K. & Peters, W. (2010). Lehrbuch der Entomologie: Band 1. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. [●]
- (7) Erklären Sie die Erregung des Herzens am Beispiel der Wirbeltiere.
- (8) Wozu gibt es bei einigen Tieren ein Lymphsystem?
- (9) Erläutern Sie die Aufgaben der Blutflüssigkeit.
- (10) Erläutern Sie, wie in der Blutflüssigkeit Sauerstoff transportiert wird und weshalb dies so erfolgt.
- (11) Welche respiratorischen Proteine gibt es?

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.
- 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 Education.
- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (Unter Mitarbeit von Monika Stengl. 8. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Hildebrand, M. & Goslow, G. E. (2004). *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Heidelberg: Springer.

Munk, K. (2011). *Zoologie* (Unter Mitarbeit von Hartmut Böhm, Jutta Heidelbach und Christian Hölscher. [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 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

Abbildung 2.4: **Herz Säugetier**. Ursprünglicher Bildtitel: Functional schematic of opened heart; Bild von: Jakov; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_the_human_heart_\(cropped\)_de.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_the_human_heart_(cropped)_de.svg)

Abbildung 2.5: **Herz Fisch**. Ursprünglicher Bildtitel: Two-chamber heart of a fish; Bild von: Ahnode; 2019; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Two_chamber_heart.svg

Abbildung 2.6: **Kreislauf Fische**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung des Blutkreislaufs der Fische; Bild von: Lennert, B.; 2005; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blutkreislauf_Fische.svg

Abbildung 2.7: **Kreislauf Reptilien**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung des Blutkreislaufs der Reptilien; Bild von: Lennert, B.; 2005; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Blutkreislauf#/media/Datei:Blutkreislauf_Reptilien.svg

Abbildung 2.8: **Kreislauf Säugetiere**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematischer Aufbau eines doppelten Blutkreislaufs; Bild von: Lennert, B.; 2005; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Blutkreislauf#/media/Datei:Blutkreislauf_Gleichwarme.svg

Abbildung 2.9: **Glanzstreifen Herzmuskelzelle der Wirbeltiere**. Ursprünglicher Bildtitel: Herzmuskelzellen im Längs- und Querschnitt; Bild von: Rollroter; 2014; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muskel_Herz_\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muskel_Herz_(1).jpg)

Abbildung 2.10: **Lymphkapillare im Gewebe**. Ursprünglicher Bildtitel: Lymphkapillare im Gewebezwischenraum; Bild von: SEER; o. J.; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illu_lymph_capillary_de.png

Abbildung 2.11: **Lymphsystem Schema**. Bild von: Armin Baur; 2020.

Abbildung 2.12: **Reizleitung Herz Säugetier**. Bild aus: Baur, Armin (2015): Humanbiologie für Lehramtsstudierende. Ein Arbeits- und Studienbuch. Berlin: Springer Spektrum.

Abbildung 2.13: **Tunikaten Kolonie**. Ursprünglicher Bildtitel: Tunicate colony *Clavelina moluccensis*; Bild von: Nhobgood; 2005; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bluebell_tunicates_Nick_Hobgood.jpg

Abbildung 2.14: **Bau eines Tunikaten**. Ursprünglicher Bildtitel: Internal anatomy of a tunicate (Urochordata); Bild von: Jon Houseman; 2013; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Tunicata_anatomy?uselang=de#/media/File:Uroc005b.png

3. Atmung

Der Begriff Atmung bezeichnet eigentlich zwei unterschiedliche Vorgänge, den Gasaustausch eines Organismus mit der Umwelt und Stoffwechselprozesse zum Energiegewinn in der Zelle (Zellatmung).

Meist wird bei der Bedeutung des Gasaustausches immer die Aufnahme von Sauerstoff (O₂) angeführt. Dies ist nicht der einzige wichtige Grund, wozu Atmung notwendig ist, auch das Kohlenstoffdioxid (CO₂) muss aus dem Organismus transportiert werden.

Nicht alle Organismen benötigen Sauerstoff, einige Organismen überleben, indem sie andere Moleküle für die Atmung nutzen.



Abb. 3.1: Atmen unter Wasser

Bild: Bschor, 2013

- Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die Bedeutung der Atmung erklären,
 - Unterschiede der aquatischen und terrestrischen Organismen in Bezug auf die Atmung erläutern,
 - die verschiedenen Atmungssysteme erklären,
 - die verschiedenen Atmungssysteme zuordnen,
 - Unter- und Überdruckatmung vergleichen,
 - den Zusammenhang von Atmung und Stoffwechsel erläutern.

3.1 Grundbegriffe Atmung

(A) Äußere Atmung (Respiration)

Der Terminus „äußere Atmung“ wird für den Prozess des Gasaustausches – die Aufnahme von O₂ und die Abgabe von CO₂ – verwendet. Zur äußeren Atmung zählen auch der Transport der Atemgase im Körper und der Austausch der Gase zwischen Blutflüssigkeit und Zelle. Umgangssprachlich wird Atmung oft mit äußerer Atmung gleichgesetzt.

Die Aufnahme von O₂ ist für den Großteil der Organismen zum oxidativen Abbau der Nährstoffe und zur Gewinnung von Energie notwendig. Bei diesem Abbau entsteht CO₂. Die Abgabe dieses anfallenden Gases (CO₂) muss zur Aufrechterhaltung eines geeigneten pH-Werts des Körpers stattfinden. CO₂ reagiert mit Wasser teilweise zu Kohlensäure (CO₂ + H₂O → H₂CO₃). Ist die Menge von CO₂ im Blut und in der Lymphe hoch, entsteht viel Kohlensäure. Wird viel CO₂ abgegeben, reagiert Kohlensäure umgekehrt zu CO₂ und H₂O und der pH-Wert verändert sich. Die Atmung ist daher eine der Möglichkeiten zur Regulation des pH-Werts im Körper (Säure-Basen-Haushalt).

Die Aufnahme und Abgabe der Gase aus oder in die Umwelt erfolgt über die *respiratorische Oberfläche*.

(B) Respiratorische Oberfläche

Der Gasaustausch zwischen Organismus und Umwelt findet über eine Membran, die respiratorische Oberfläche, statt. Von Vorteil bei diesem Gasaustausch, der über Diffusion erfolgt, ist es, wenn die respiratorische Membran eine maximal große Oberfläche aufweist. Je mehr Oberfläche, umso mehr Moleküle können diffundieren (siehe zur Verdeutlichung Abb. 3.2, Abb. 3.3 und Abb. 3.4).

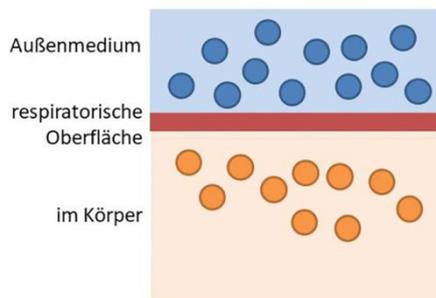


Abb. 3.2: Respiratorische Oberfläche

(Bilder Abb. 3.2 – 3.6: Baur, 2018)

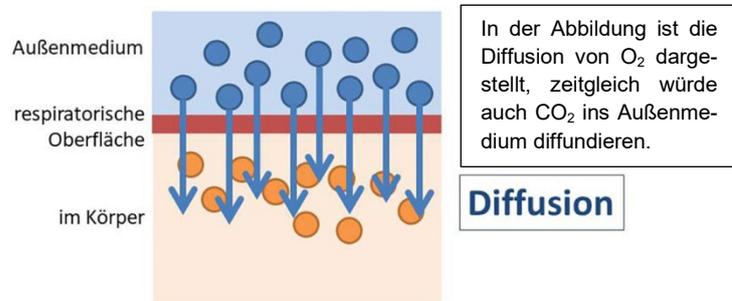
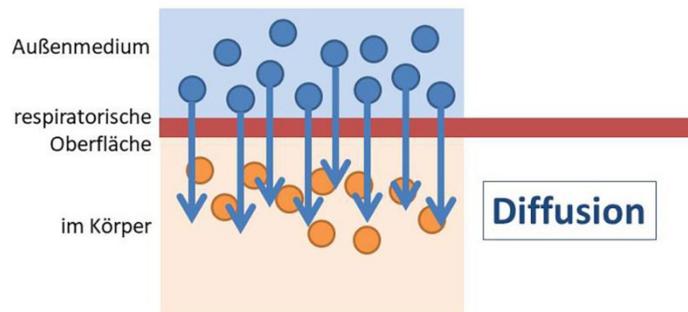


Abb. 3.3: Diffusion von Sauerstoff über respiratorische Oberfläche

Abb. 3.4: Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche



Damit eine sehr großflächige respiratorische Oberfläche im Körper beziehungsweise am Körper Platz findet, ist diese gefaltet (siehe Abb. 3.5 und Abb. 3.6).



Abb. 3.5: Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche

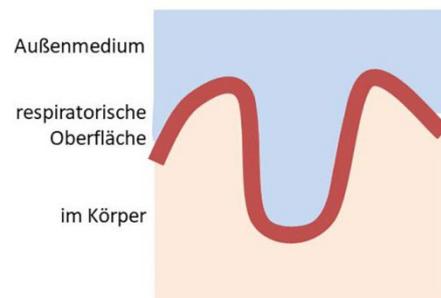


Abb. 3.6: Faltung der respiratorischen Oberfläche

Um den Diffusionsweg gering zu halten und den Diffusionswiderstand zu minimieren, muss die Membran dünn und feucht sein. Bei Organismen mit einem geschlossenen Kreislaufsystem ist es von Vorteil, wenn zudem viele Blutgefäße an der Membran anliegen.

(C) Innere Atmung (Zellatmung)

Die „innere Atmung“ wird auch Zellatmung genannt. Die innere Atmung ist ein Stoffwechselprozess, bei dem meist aerob (unter Verwendung von O₂) Nährstoffe in Energie umgewandelt werden. Kurz gefasst: Abbau von Nährstoffen zu H⁺, e⁻, CO₂ und danach Redoxreaktion an Proteinen der Mitochondrien und Oxidation von O₂ → 1/2 O₂ + 2H⁺ + 2e⁻ = H₂O + Energie. Die Teilprozesse der inneren Atmung sind die Glykolyse, der Citratzyklus und die Endoxidation (Atmungskette).

3.2 Unterschiede zwischen Land- und Wassertieren

Terrestrische Tiere (Tiere, die an Land leben), atmen Luft der Atmosphäre ein und aus. Die atmosphärische Luft enthält ca. 21 % O₂. Ein großes Problem stellt beim Leben an Land das Feuchthalten der respiratorischen Oberfläche dar. Diese Feuchthaltung ist sehr aufwendig, da viel Wasserdampf mit abgeatmet wird. Die respiratorische Oberfläche der terrestrischen Tiere ist meist durch eine Einstülpung (Invagination) von Körperoberfläche in das Körperinnere entstanden. Die Atmungsorgane der Landtiere sind beispielsweise Lungen oder Tracheen.

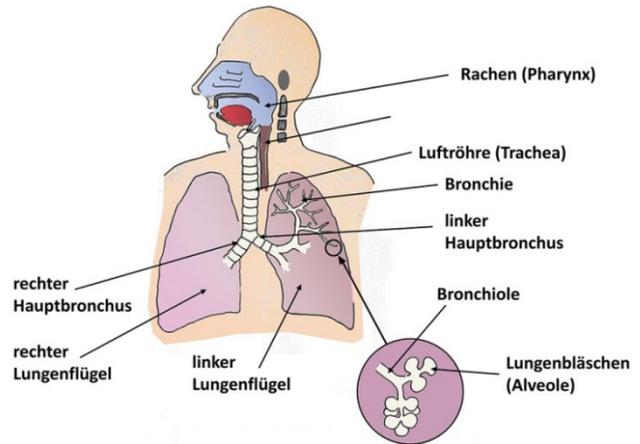


Abb. 3.7: Lunge Säugetier am Beispiel Mensch

Bild: Baur, 2015

Aquatische Tiere (Tiere, die im Süß-, Salz- oder Brackwasser¹ leben) nehmen den Sauerstoff aus dem Wasser auf. Dies stellt ein Problem dar, da sich Sauerstoff im Wasser schlecht löst. Im Wasser befindet sich ca. 1 % O₂ gelöst. Hingegen ist die Feuchthaltung der respiratorischen Oberfläche problemlos möglich, da sich der gesamte Organismus im Wasser befindet. Die respiratorische Oberfläche der aquatischen Tiere entstand meist durch eine Ausstülpung (Exvagination) von Körperoberfläche. Die Atmungsorgane von aquatischen Tieren sind beispielsweise Kiemen.



Abb. 3.8: Kiemen Larve Kammolch
Triturus cristatus

Bild: Spaans, o. J.

3.3 Atmungsorgane

(A) Oberfläche/Außenhaut

Einzeller (Bakterien und Protozoen) wie auch einfach gebaute Vielzeller (beispielsweise Schwämme oder Nesseltiere) atmen über ihre gesamte Körperoberfläche, komplexere Vielzeller (beispielsweise Ringelwürmer oder auch teilweise Amphibien und Fische) über die Außenhaut. Die Atmung bei komplexen Vielzel-



Abb. 3.9: Vasenschwämme

Bild: Kok, 2007

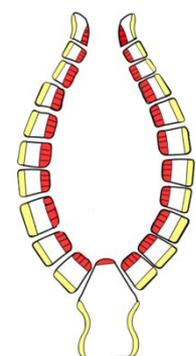


Abb. 3.10: Bau Schwamm

Rot: Zellen, die den Inneren Hohlraum begrenzen; Gelb: Zellen, die die Außenfläche bilden

Bild: Born, 2008, verändert

¹ Brackwasser: Mischwasser aus Salz- und Süßwasser. Brackwasser findet sich an den Übergangsstellen, in denen die Flüsse in die Meere münden.

lern über die Außenhaut heißt *kutane Atmung*. Sie unterscheidet sich von der Atmung der Einzeller und einfach gebauten Vielzellern dadurch, dass nicht über die gesamte Körperoberfläche (Außenfläche und Innenfläche) eine Diffusion der Atemgase stattfindet.

(B) Tracheen

Viele Gliederfüßer (*Arthropoda*: Insekten, Tausendfüßer, manche Spinnentiere) atmen über ein feines Röhrensystem. Das Röhrensystem besteht aus vielen kleinen Röhren, die Tracheen heißen. Die Tracheen beginnen am Exoskelett (Chitinpanzer) und gehen in feine, mit Flüssigkeit gefüllte Tracheolen über, die an den Zellen münden. Die Öffnungen – Atemlöcher – im Exoskelett, an denen die Tracheen beginnen, sind die Stigmen (Einzahl: Stigma). Die Stigmen sind mit einer Art Sieb (Reuse) ausgestattet, um zu verhindern, dass Schmutz und Parasiten in die Tracheen gelangen. Die Atmung erfolgt passiv, O₂ strömt über Diffusion zu den Zellen und CO₂ genauso von den Zellen in die Umwelt. Die Tracheen ermöglichen die Diffusion. Die Funktion dieses Atemsystems ist von der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs abhängig. Wären die Tracheen zu lange, würde das System nicht mehr funktionieren. Daher findet man es nur bei kleinen Tieren. Größere Arthropoden haben zusätzlich Luftsäcke (z. B. Honigbienen), die die Funktion durch aktiven Luftaustausch (Ventilation) unterstützen. Bei manchen Arten der Arthropoden konnte man sogar eine rhythmische Kompression der Tracheen zum aktiven Luftaustausch feststellen (siehe z. B. Socha et al., 2008).

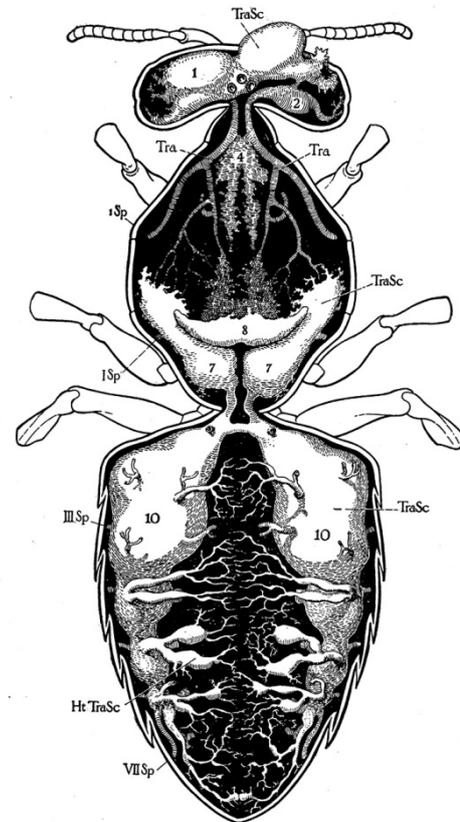


Abb. 3.11: Tracheensystem Honigbiene

Apis mellifera

Tra: Trachee; TraSc: Luftsack;

Sp: Atemloch (Stigma)

Bild: Snodgrass, 1910

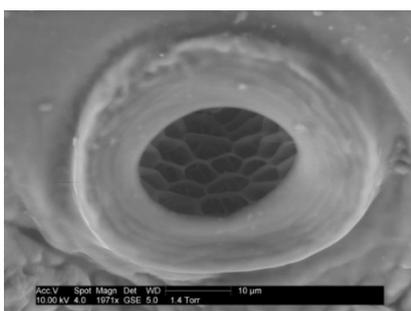


Abb. 3.12: Atemloch (Stigma) einer Kopflaus mit Reuse

Pediculus humanus

Bild: Burgess, 2013



Abb. 3.13: Tracheensystem Küchenschabe

Nauphoeta cinerea

Bild: Hunter, 2014

(C) Kiemen (Branchien)

Kiemen sind eine Oberflächenvergrößerung nach außen mit der Funktion der Atmung. Kiemen werden fachwissenschaftlich Branchien genannt. Die Ausstülpungen, Faltungen und Verzweigungen der Körperoberfläche, die die Kiemen bilden, sind sehr dünn und daher leicht verletzlich (sie werden auch oft und gerne von Fressfeinden angefressen). Diese Verletzlichkeit führte dazu, dass bei etlichen Organismen die Kiemen (äußere Kiemen) im Verlauf der Evolution mit einer Schutzstruktur in Form von Kiemenhöhlen versehen wurden (innere Kiemen).

Äußere Kiemen findet man bei den Vielborstern (*Polychaeta*: eine Gruppe der Ringelwürmer), bei Amphibienlarven und Insektenlarven. Bei diesen Organismen ist eine starke Verzweigung oder Faltung der Körperoberfläche sichtbar.



Abb. 3.14: Vielborster
Nereis succinea

An jedem Segment sind ein Paar Parapodien (Scheinfüßchen) ausgebildet, die zur Fortbewegung und zur Atmung (Kiemen) Verwendung finden.

Bild: Hillewaert, 2007



Abb. 3.15: Axolotl
Ambystoma mexicanum

Bild: Mühlpfordt, 2010

Innere Kiemen findet man bei vielen Krebsen (*Crustacea*), Weichtieren (*Mollusca*: Schnecken, Muscheln, Kopffüßern) und Fischen.

Bei den Fischen werden die Kiemen durch Kiemenbögen gestützt (Knorpelstruktur). Die Kiemenbüschel liegen offen seitlich in der Mundhöhle. Je nach Fischgruppe führen Kiemenspalten (bei Knorpelfischen *Chondrichthyes*) oder die Öffnungen unter den Kiemendeckeln (bei Knochenfischen *Osteichthyes*) von der Mundhöhle nach außen. Bei der Ventilation (Atembewegung) wird bei geschlossenen Kiemendeckeln und offenem Maul der Mundboden nach unten gezogen. Dies führt zum Einströmen von Frischwasser (hohe O₂-Konzentration) zu den Kiemenbögen. Nun werden das Maul geschlossen und der Mundboden nach oben gedrückt (Druckpumpe) sowie die Kiemendeckel geöffnet (Saug-

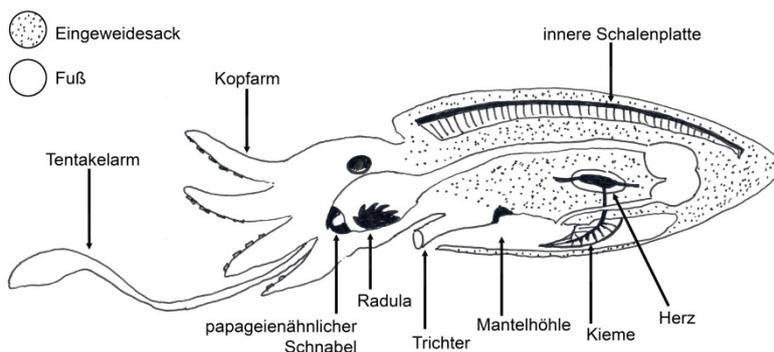


Abb. 3.16: Bau Kopffüßer

Bild: Baur, 2018

pumpe), hierdurch strömt das Wasser in einer Richtung wieder nach außen und die Kiemen werden ständig mit Frischwasser umspült. Die Blutführung in den Kiemenfilamenten ist so angelegt, dass das O₂-reiche Blut in den Bereichen strömt, die zuerst mit dem Frischwasser in Berührung kommen, und dadurch der Konzentrationsunterschied des Sauerstoffs trotzdem hoch ist. Das O₂-arme Blut strömt in den Bereichen, die später mit dem (Frisch-)Wasser in Berührung sind. Da das O₂-arme Blut weniger O₂ in sich hat, ist der Konzentrationsunterschied zwischen Wasser und Blut immer noch hoch und eine maximale Diffusion kann stattfinden. Man nennt dieses Prinzip **Gegenstromaustausch**. Knorpelfische haben keinen Kiemendeckel, daher muss bei vielen Knorpelfischen eine ständige Schwimmbewegung erfolgen, damit das Wasser durch das Maul an den Kiemen vorbeiströmen kann.

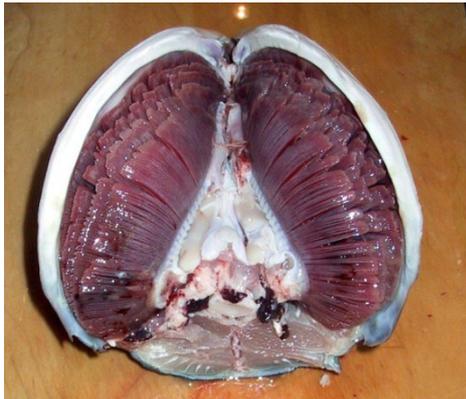


Abb. 3.17: Kiemen und Kiemendeckel Thunfisch
Thunnus

Bild: Chris, 2005

(D) Physikalische Kieme

Tauchende Schwimmkäfer, Wasserwanzen und Wasserspinnen nehmen sich eine Luftblase mit unter Wasser. Aus diesem Luftvorrat entnehmen die Tiere bei der Atmung während der Tauchzeit O₂. Hierdurch verändert sich der Partialdruck von O₂ in der Luftblase, was zur Diffusion von O₂ aus dem Wasser in die Luftblase führt. Da durch den veränderten Partialdruck (Teildruck eines Gases in einem Gasgemisch) von O₂ aber auch Stickstoff (N₂) aus der Blase ins Wasser diffundiert, wird die Luftblase langsam kleiner. Von Zeit zu Zeit müssen die Tiere daher wieder an die Wasseroberfläche schwimmen und die Luftblase erneuern. Durch die physikalische Kieme kann achtmal so viel Sauerstoff bereitgestellt werden wie ursprünglich mit unter Wasser genommen wurde. Für die physikalische Kieme werden Körperhaare oder eine Deckschicht benötigt, mit denen bzw. der die Luftblase am Körper fixiert wird.

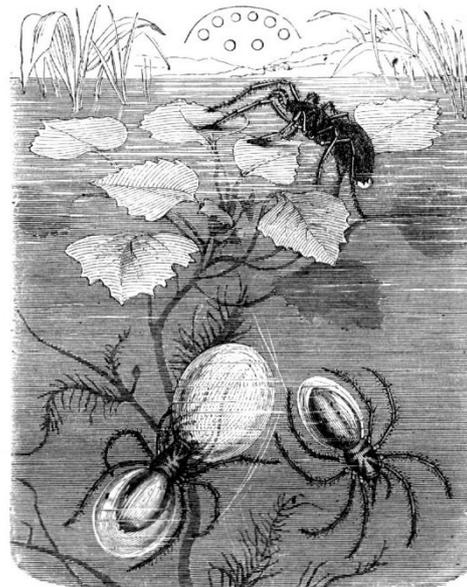


Abb. 3.18: Physikalische Kieme Wasserspinne
Argyroneta aquatica

Unten rechts: Spinne taucht mit Luftblase am Faden entlang ab; Bild unten links: Spinne bringt Luftblase in ihr Luftdepot

Bild: Brehm, 1884

Physikalische Kieme der Wasserspinne

Die Gemeine Wasserspinne (*Argyroneta aquatica*) holt sich eine Luftblase, indem sie ihre Hinterbeine und einen Teil ihres Hinterkörpers aus dem Wasser streckt und diese ruckartig wieder unter das Wasser zieht. Hierbei bleibt Luft, die als Blase mitgenommen wird, an den Körperhaaren und zwischen den Beinen gebunden. Die Spinne zieht sich entlang eines Fadens zu ihrem Luftdepot (Luftblase, die mit einem Netz fixiert ist) und streift die aufgenommene Luft dort ab. In diesem Luftdepot („Taucherglocke“) spielt sich ein Großteil des Lebens der Spinne ab. Das Luftdepot ist eine physikalische Kieme (siehe Abb. 3.18).

(E) Lungen (Pulmonale Atmung)

Lungen sind Einstülpungen in den Körper, die der Oberflächenvergrößerung dienen und an denen ein Gasaustausch stattfindet. Lungen können ventiliert werden (was bedeutet, dass aktiv – durch Muskelkraft – Luft in die Lunge und aus ihr heraus gebracht wird) oder es können die Atemgase hauptsächlich durch Diffusion in die Lunge strömen.

In die bzw. aus der **Buchlung** oder auch Fächerlunge der Spinnentiere (z. B. Webspinnen, Skorpione) strömen die Atemgase durch Diffusion. Die Atmung erfolgt bei etlichen Arten ohne Ventilation. Die Einstülpung erinnert im Querschnitt an die Seiten eines Buches. Zwischen den Seiten fließt Hämolymphe, über die O₂ aufgenommen und CO₂ in das Lumen der Buchlung (in die Lufttaschen) abgegeben wird. Die Hämolymphe aus der Buchlung wird bei der Füllungsphase des Herzens direkt über die Ostien in das Herz gesogen und Hämolymphe aus der Leibeshöhle fließt in die Buchlung.

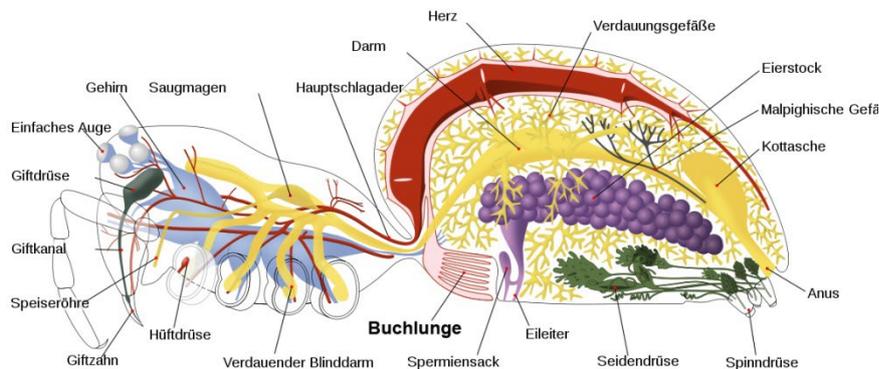


Abb. 3.19: Buchlung bei einer Webspinne

Bild: Comstock, 2010

Die **Lungen** der Wirbeltiere (*Vertebrata*) werden **ventiliert** (Belüftet durch Muskelkraft). Man kann hierbei zwischen einer **Überdruckatmung** und einer **Unterdruckatmung** unterscheiden. Die Überdruckatmung (auch Schluckatmung) findet man bei Amphibien (*Amphibia*). Nicht nur in ihrer Funktionsweise, sondern auch in ihrem Aufbau in Bezug auf die Oberfläche unterscheiden sich die Lungen der Wirbeltiere (siehe Abb. 3.22). Die Tiere, die endotherm (gleichwarm) sind, haben im Verhältnis größere Oberflächen (bei Säugetieren *Mammalia*) bzw. eine effizientere Lungenfunktion (bei den Vögeln *Aves*), um mehr O₂ aufnehmen zu können. Zur Wärmerezeugung, um die Temperatur konstant zu halten, wird Energie benötigt, deren Bereitstellung mit der Aufnahme von O₂ verbunden ist.

Bei der **Unterdruckatmung** (z. B. Säugetiere) wird bei der Einatmung das Volumen der am Brustkorb befestigten Lunge durch die Atembewegung vergrößert. Hierdurch sind weniger Luftteilchen pro Volumeneinheit im Verhältnis zu den Luftteilchen pro Volumeneinheit der Umwelt in der Lunge, wodurch in der Lunge ein Unterdruck entsteht und Luft in die Lunge strömt. Bei der Ausatmung wird das Volumen der Lunge verkleinert und die Luft wird aus der Lunge gedrückt. In der Lunge findet der Gasaustausch statt.

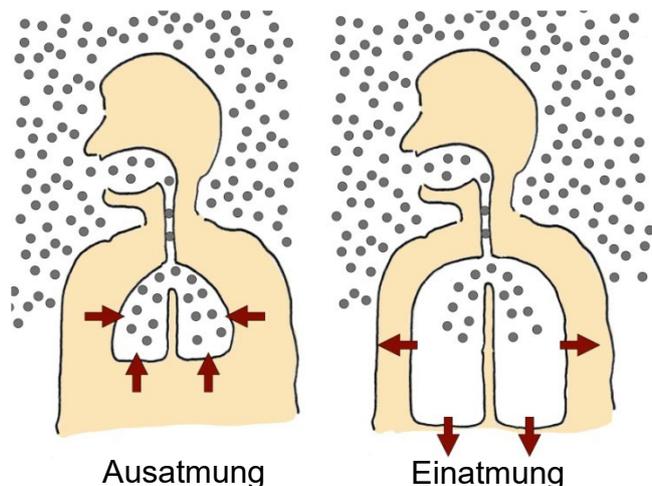


Abb. 3.20: Ventilation durch Unterdruckatmung

Bei der **Überdruckatmung** wird zur Einatmung die Luft in die Lungen gepresst und die

Bild: Baur, 2019

elastische, nicht aufgehängte und dadurch aufgespannte Lunge dehnt sich aus. Bei der Ausatmung zieht sich die Lunge durch die Eigenelastizität wieder zusammen und die Luft wird aus der Lunge gedrückt (siehe Abb. 3.21). Beim Einatmen verschließt sich die Glottis, die Nasenöffnung ist geöffnet und der Grund der Schlundhöhle wird abgesenkt. Hierdurch wird Luft in den Mundraum gesogen. Nun wird das Nasenloch verschlossen, die Glottis geöffnet und der Grund der Schlundhöhle angehoben. Dadurch wird Luft in die Lunge gepresst.

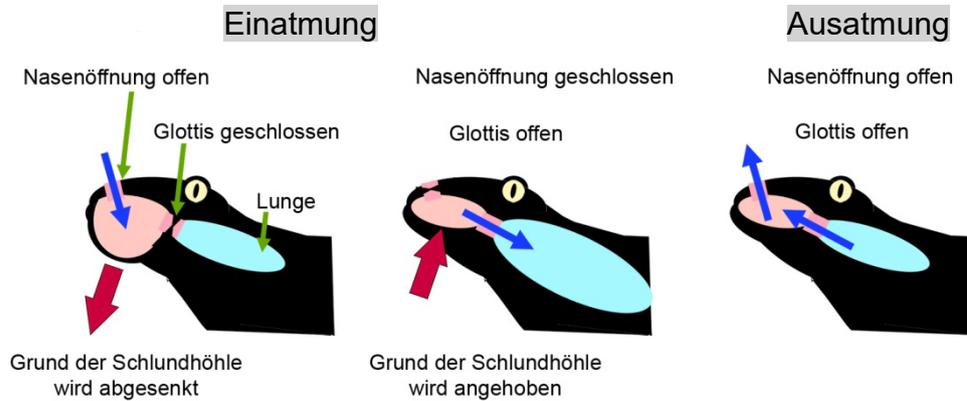


Abb. 3.21: Überdruckatmung Frosch

Bild: Baur, 2019

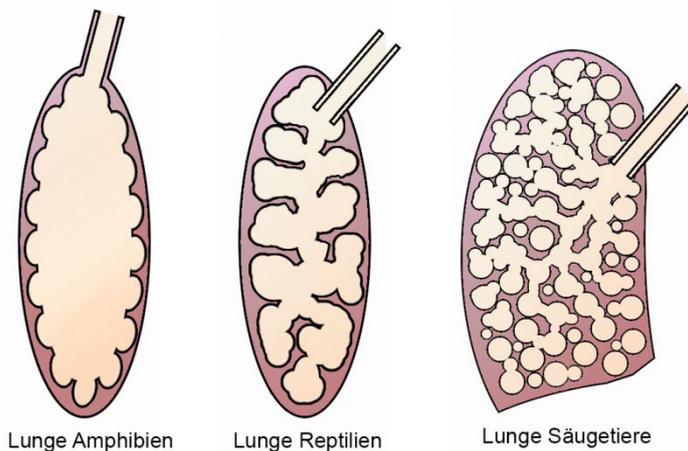


Abb. 3.22: Lungen verschiedener Wirbeltiere im Vergleich

Bild: Baur, 2019

Die Lunge der Vögel unterscheidet sich von den Lungen der anderen Wirbeltiere. Die beiden Lungenflügel der Vogellunge sind jeweils mit Luftsäcken verbunden (siehe Abb. 3.23). Ein weiterer Unterschied ist, dass es in der Lunge keine Lungenbläschen (Alveolen) sondern Parabronchien – dünne Röhren – gibt, an denen der Gasaustausch stattfindet. Beim Einatmen verändert sich nicht das Lungenvolumen, sondern die Veränderung des Volumens der Luftsäcke sorgt für das Einströmen von frischer Atemluft in die Lunge und in die hinteren Luftsäcke. Gleichzeitig wird die verbrauchte Luft aus den Parabronchien in die vorderen Luftsäcke gezogen. Bei der Ausatmung werden die Luftsäcke zusammengedrückt und dadurch wird die verbrauchte Luft aus der Lunge und aus den vorderen Luftsäcken an die Umwelt abgegeben. Durch das Zusammenpressen der hinteren Luftsäcke strömt die enthaltene frische Atemluft in die Parabronchien. Die Parabronchien sind dadurch ständig mit O₂-reicher Luft gefüllt. Diese effiziente Lunge stellt genug Sauerstoff zur Energiegewinnung bereit, um das Aufrechterhalten der Körpertemperatur (endotherme Tiere) und das Fliegen zu ermöglichen.

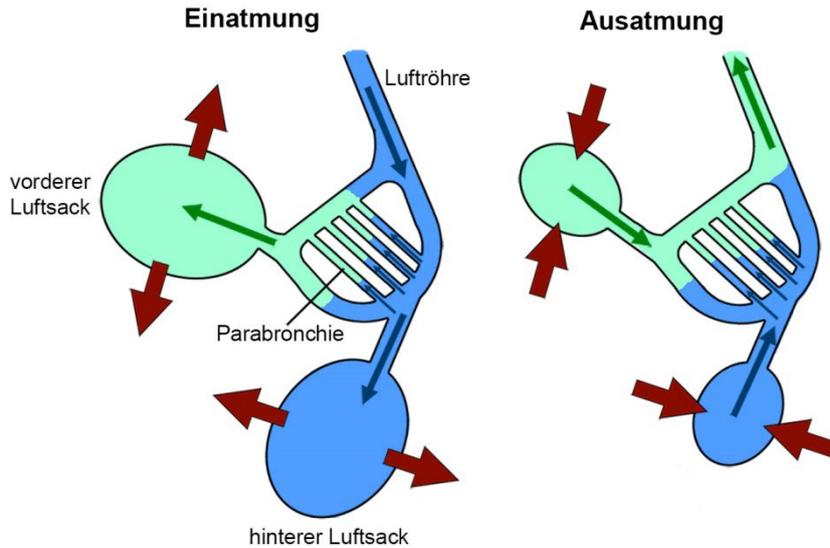


Abb. 3.23: Ventilation Vogellunge

Bild: Baur, 2019

3.4 Zellatmung

Bei der Zellatmung (innere Atmung) werden in den Zellen der Organismen energiereiche Verbindungen (anorganische Stoffe oder organische Stoffe) oxidiert und hierbei werden Elektronen (und Wasserstoff-Ionen H^+) freigesetzt. Die Elektronen werden über Redoxreaktionen letztendlich auf einen terminalen Elektronenakzeptor übertragen. Hierbei wird Energie zur Bildung von ATP aus $ADP + P_i$ frei. Bei der aeroben Form ist der Elektronenakzeptor $\frac{1}{2} O_2$, bei den anaeroben Formen sind dies organische Stoffwechselprodukte (Gärung; siehe Abb. 3.24 und 3.25) oder anorganische Stoffe (anaerobe Atmung).

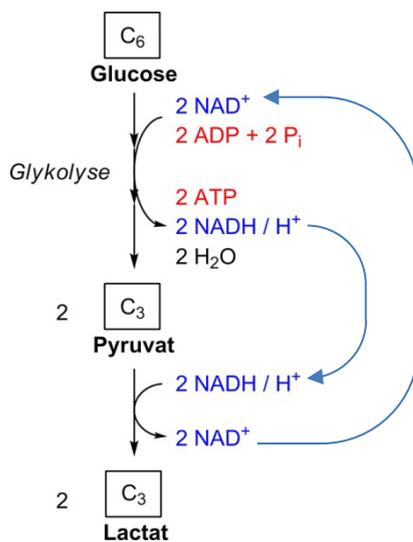


Abb. 3.24: Milchsäuregärung

Bild: Yikrazuul, 2009

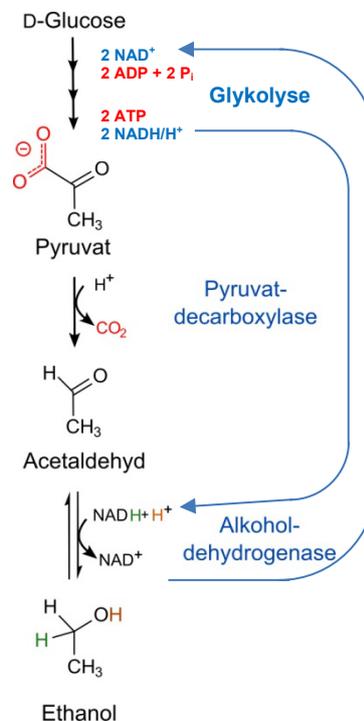


Abb. 3.25: Alkoholische Gärung

Bild: Norro, 2006



Nachbereitung / Übung

Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

aerob	Elektronenakzeptor	Respiration
Alveolen	Gärung	respiratorische Oberfläche
anaerob	Gegenstromaustausch	Säure-Basen-Haushalt
aquatisch	innere Atmung	terrestrisch
Atmung	Kohlensäure	Überdruckatmung
äußere Atmung	kutane Atmung	Unterdruckatmung
Branchien	Parabronchien	Ventilation
Diffusion	Partialdruck	Zellatmung

Aufgabe 2:

- (1) Wie muss die respiratorische Oberfläche gestaltet/aufgebaut sein?
- (2) Vergleichen Sie die äußere mit der inneren Atmung.
- (3) Führen Sie die Teilprozesse der Zellatmung auf.
- (4) Beschreiben Sie grob die Vorgänge der Zellatmung. (Welche Stoffe sind an den Reaktionen beteiligt und welche entstehen?)
- (5) Worin unterscheidet sich die Atmung an Land und im Wasser?
- (6) Wie funktioniert eine physikalische Kieme?
- (7) Wie funktioniert die Atmung über Tracheen?
- (8) Vergleichen Sie die Buchlung und die Lunge der Wirbeltiere.
- (9) Worin unterscheiden sich die Wirbeltierlungen?
- (10) Warum können Amphibien und Reptilien mit ihren Lungen gut leben?
- (11) Stellen Sie den Bau und die Funktion von Kiemen dem Bau und der Funktion von Lungen gegenüber.

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.
- 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 Education.

- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (Unter Mitarbeit von Monika Stengl. 8. Auflage). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Hildebrandt, M. & Goslow, G. E. (2004). *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Heidelberg: Springer.
- Munk, K. (2011). *Zoologie* (Unter Mitarbeit von Hartmut Böhm, Jutta Heidelbach und Christian Hölscher. [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.
- Socha, J. J., Lee, W.-K., Harrison, J. F., Waters, J. S.; Fezzaa, K. & Westneat, M. W. (2008). Correlated patterns of tracheal compression and convective gas exchange in a carabid beetle. *The Journal of Experimental Biology*, 211, 3409–3420.
- Wehner, R. & Gehring, W. J. (2013). *Zoologie* (25. Auflage). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Abbildungen

- Abbildung 3.1: **Atmen unter Wasser**. Bild von: Nicolas Bschor; 2013; Lizenz: Bild auf Pixabay; <https://pixabay.com/de/photos/tauchen-taucher-unterwasser-1652869/>
- Abbildung 3.2: **Respiratorische Oberfläche**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.3: **Diffusion von Sauerstoff über respiratorische Oberfläche**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.4: **Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.5: **Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.6: **Faltung der respiratorischen Oberfläche**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.7: **Lunge Säugetier am Beispiel Mensch**. Bild von: Armin Baur; 2016. Bild ursprünglich aus: Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierende: Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.
- Abbildung 3.8: **Kiemens Larve Kammolch**. Ursprünglicher Bildtitel: Larve des nördlichen Kammolchs; Bild von: Piet Spaans; o. J.; Lizenz: CC BY 2.5; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kieme#/media/Datei:LarveKamsalamander.JPG>
- Abbildung 3.9: **Vasenschwämme**. Ursprünglicher Bildtitel: Große Vasenschwämme; Bild von: Albert Kok; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwämme#/media/Datei:Vaasspons2.jpg>
- Abbildung 3.10: **Bau Schwamm**. Ursprünglicher Bildtitel: Formes des éponges; Bild von: Ewan ar Born; 2008; Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porifera_Types-fr.svg; verändert.
- Abbildung 3.11: **Tracheensystem Honigbiene**. Ursprünglicher Bildtitel: Tracheal system of worker; Bild von: R. E. Snodgrass, 1910; *The Anatomie of the Honey Bee*. Washington: Government Printing Office, S. 117.
- Abbildung 3.12: **Atemloch (Stigma) einer Kopflaus mit Reuse**. Ursprünglicher Bildtitel: Elektronenmikroskopische Aufnahme des Stigmas einer Kopflaus; Bild von: Burgess IF; 2013; Lizenz: CC BY 2,5; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee_\(Wirbellose\)#/media/Datei:Pediculus_capitis_thoracic_spiracle.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee_(Wirbellose)#/media/Datei:Pediculus_capitis_thoracic_spiracle.png)
- Abbildung 3.13: **Tracheensystem Küchenschabe**. Ursprünglicher Bildtitel: Tracheen einer Küchenschabe; Bild von: Adrian J. Hunter; 2014; Lizenz: CC BY-SA 4,0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee_\(Wirbellose\)#/media/Datei:Tracheal_system_of_dissected_cockroach.tif](https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee_(Wirbellose)#/media/Datei:Tracheal_system_of_dissected_cockroach.tif)
- Abbildung 3.14: **Vielborster**. Ursprünglicher Bildtitel: Nerreis succinea; Bild von: Hans Hillewaert; 2007; Lizenz: CC BY-SA 4,0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Nereis#/media/Datei:Alitta_succinea_\(epitoke\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Nereis#/media/Datei:Alitta_succinea_(epitoke).jpg)
- Abbildung 3.15: **Axolotl**. Ursprünglicher Bildtitel: Außenkiemen eines Axolotl; Bild von: Henry Mühlpfordt; 2010; Lizenz: CC BY-SA 3,0; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Kieme#/media/Datei:Leucistic_female_Axolotl_head_side_view2_2010-02-24.jpg
- Abbildung 3.16: **Bau Kopffüßer**. Bild von: Armin Baur; 2018.
- Abbildung 3.17: **Kiemens und Kiemendeckel Thunfisch**. Ursprünglicher Bildtitel: Innere Kiemen eines Tunfisches; Bild von: Chris 73; 2005; Lizenz: CC BY-SA 3,0; verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Kieme#/media/Datei:Tuna_Gills_in_Situ_01.jpg

Abbildung 3.18: **Physikalische Kieme Wasserspinne**. Ursprünglicher Bildtitel: Skizze mehrerer Exemplare – Gemeine Wasserspinne; Bild von: Alfred Brehm; 1884; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserspinne#/media/Datei:Wasserspinne.jpg>

Abbildung 3.19: **Buchlung 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

Abbildung 3.20: **Ventilation durch Unterdruckatmung**. Bild von: Armin Baur; 2019. Bild ursprünglich aus: Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierende: Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.

Abbildung 3.21: **Überdruckatmung Frosch**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.22: **Lungen im Vergleich**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.23: **Ventilation Vogellunge**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 3.24: **Milchsäuregärung**. Ursprünglicher Bildtitel: Homofermentative Milchsäuregärung, Übersicht; Bild von: Yikrazuul; 2009; Lizenz: public domain; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homofermentative_Milchsäuregärung.png; verändert.

Abbildung 3.25: **Alkoholische Gärung**. Ursprünglicher Bildtitel: Ablauf alkoholische Gärung; Bild von: Norro; 2006; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ethanol_fermentation_de.svg; verändert.