

## 4. Nahrungserwerb und Verdauung

Um am Leben zu bleiben, brauchen alle Organismen, die keine Photosynthese betreiben und ihre organischen Moleküle nicht selbst aufbauen können, Nahrung. Die erworbene Nahrung wird über einen Verdauungsprozess in die jeweiligen Monomere (Grundbausteine) der Nährstoffe aufgespalten. Nach dem Aufspalten, das in einem Verdauungstrakt stattfindet, werden die Monomere in den Körper aufgenommen und gelangen bei komplexeren Organismen über die Blutflüssigkeit zu den Zellen. In den Zellen werden die Moleküle (Monosaccharide, Fettsäuren, Aminosäuren) über Stoffwechselprozesse im Baustoffwechsel zu Bau- bzw. Wirkstoffen um- oder im Betriebstoffwechsel zur Energiegewinnung abgebaut.



**Abb. 4.1:** Eichelhäher frisst Nuss  
*Garrulus glandarius*

Bild: Oldiefan, 2018

### - Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die unterschiedliche Formen des Nahrungserwerbes beschreiben;
  - die Nährstoffe nennen;
  - die Vorgänge, die bei der Verdauung stattfinden, erläutern;
  - die Stoffwechselvorgänge beim Energiestoffwechsel beschreiben.

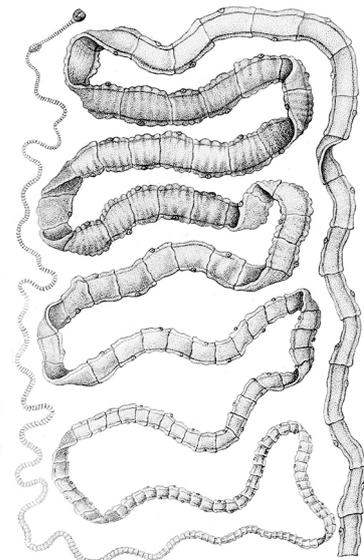
### 4.1 Nahrungserwerb

Den Nahrungserwerb der tierischen Organismen kann man in zwei Überformen untergliedern: Es gibt tierische Organismen, die die Nährstoffe über die Oberfläche absorbieren, und solche, die die Nahrung fressen.

#### **(I) Tiere, die Nährstoffe (Monomere) über die Oberfläche absorbieren**

Einige tierische Organismen nehmen nicht unverdaute Nahrung, sondern bereits aufgespaltene Monomere auf. Die tierischen Organismen, die unmittelbar Monomere aufnehmen, leben parasitär und bedienen sich im Verdauungstrakt von anderen Organismen an den Monomeren (die Nahrung wird vom Wirt verdaut). Die Monomere werden vom parasitär lebenden Organismus über dessen Körperoberfläche absorbiert.

Ein Beispiel eines solchen Tieres ist der Bandwurm (z. B. der Schweinebandwurm *Taenia solium*, Länge: 3 bis 7 m), der sich mit Widerhaken oder Saugnäpfen im Dünndarm festmacht und dort heranwächst.



**Abb. 4.2:** Schweinebandwurm  
*Taenia solium*

Bild: unbekannt, 1823

## (II) Tiere, die Nahrung aufnehmen (fressen)

Die tierischen Organismen, die ihre Nährstoffe nicht parasitär über die Oberfläche aufnehmen, müssen ihre Nahrung finden, erbeuten, diese fressen und verdauen. Man kann in Bezug auf die Nahrung drei Gruppen bei den Tieren ausmachen: herbivore Tiere (Pflanzenfresser: Herbivoren), carnivore Tiere (Fleischfresser: Carnivoren) und omnivore Tiere (Allesfresser: Omnivoren).

Die Tiere, die Nahrung fressen, können aufgrund von ihrer Strategie (Beuteerwerb und entsprechende Anpassung) in Untergruppen unterteilt werden (nachfolgend A-C).

### (A) Organismen, die kleine Organismen fressen

Manche Tiere fressen Organismen, die sehr klein sind (kleine Tiere, Einzeller, Algen) und benötigen daher zum Beutefang besondere Fangstrategien.

#### (A1) Phagozytose

Einzeller, die andere Einzeller fangen und fressen, machen dies über Phagozytose. Hierzu umfließen sie die anderen Organismen (dies machen Amöben) oder halten sie mit speziellen Strukturen fest (nicht amöbe Protozoen) und nehmen sie über einen Exocytosevorgang in ihren Körper auf. Das Phagosom (aufgenommene Nahrung in Vesikel) verschmilzt mit einem Lysosom. Im Lysosom sind Verdauungsenzyme enthalten, die die Nahrung in die Monomere aufspalten. Die Monomere gelangen über die Membran des Vesikels in die Zelle. Unverdauliches wird über Exocytose wieder ausgeschieden.

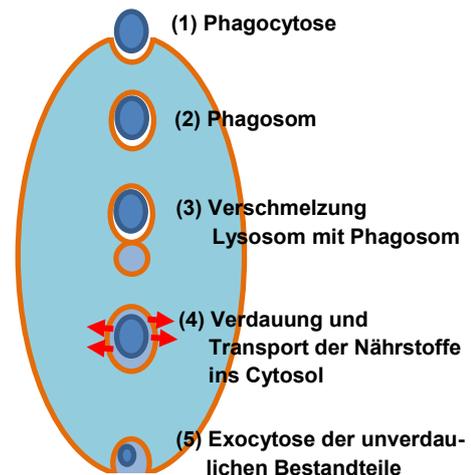


Abb. 4.3: Phagozytose und Verdauung bei Einzellern

Bild: Baur, 2019

#### (A2) Filtrierer

Tierische Organismen, die ihre Nahrung aus dem Wasser filtern, heißen Filtrierer. Zum Filtern haben sie besondere Körperorgane, die sie wie Netze oder Siebe einsetzen können. Manche Filtrierer halten ihre Filterorgane nur in das Wasser (siehe als Beispiel Abb. 4.4: Röhrenwurm) oder nehmen Wasser auf und pressen es durch die Filterorgane (siehe als Beispiel Abb. 4.5: Grönlandwal und Abb. 4.6).



Abb. 4.4: Röhrenwurm streckt Filtertentakel aus *Eudistylia polymorpha*

Bild: Gotschalk, 2004



Abb. 4.5: Briefmarke Grönlandwal  
Briefmarke aus dem Jahr 1990

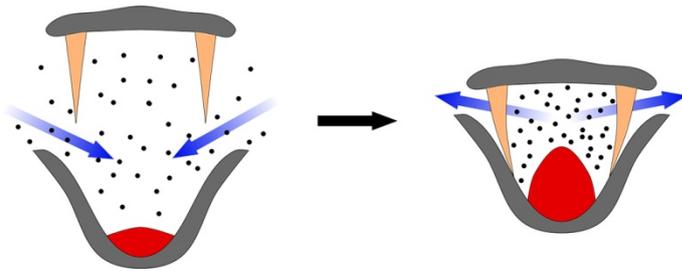


Abb. 4.6: Filtrieren bei Bartwalen

Hellbraun: Barten

Rot: Zunge

Blaue Pfeile: Wasserbewegung

Bild: Martinrr, 2011

**(A3) Strudler**

Als Strudler werden tierische Organismen bezeichnet, die einen Wasserstrom erzeugen, der am Körper vorbei oder direkt durch den Körper strömt.

Heimische Tiere, die als Strudler ihre Nahrung gewinnen, sind beispielsweise die Arten des Wasserfloh (z. B. *Daphnia pulex* oder *Daphnia magna*). Mit den im Panzer gelegenen Extremitäten erzeugen die Tiere einen Wasserstrom, der Wasser und darin gelöste Nahrungsteilchen ins Innere des Panzers führt. Die Nahrungsteilchen werden dann mit einem Filterorgan an den Extremitäten ausgesiebt und zur Mundöffnung befördert.

**(A4) Substratfresser**

Substratfresser nehmen Substrat in den Verdauungstrakt auf, verdauen die im Substrat enthaltene Nahrung in die Nährstoffe und Monomere und nehmen die Monomere über den Darm in den Körper auf. Der Rest des Substrates wird ausgeschieden.

Beispiele für Substratfresser sind Vertreter der Regenwürmer.

**(B) Organismen, die große Organismen fressen**

Hierunter fallen Tiere, die pflanzliche Beute suchen oder tierische Beute fangen. Tiere, die tierische Nahrung fangen, werden als **Beutegreifer** (Prädatoren) bezeichnet. Um große Organismen zu fangen, sind über die Evolution unterschiedliche Fangapparaturen und Fangstrategien entstanden. Tiere, die Teile von Pflanzen abfressen, werden **Weidegänger** genannt.



Abb. 4.8: Chamäleon fängt Beute

*Chamaeleo namaquensis*

Ein Chamäleon hat eine herausfahrbare Zunge, mit der die Beute gefangen wird.

Bild: Kolibri5, o. J.

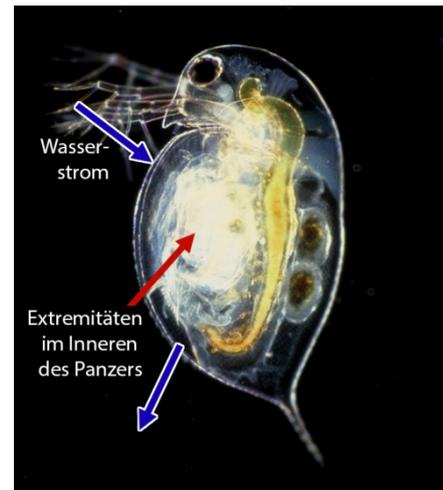


Abb. 4.7: Gewöhnlicher Wasserfloh

*Daphnia pulex*

Bild: Hebert, 2005

### (C) Aufnahme von Flüssigkeiten

Einige tierische Organismen haben sich im Verlauf der Evolution an das Aufnehmen von Flüssigkeiten, wie Pflanzensäfte oder Blutflüssigkeit, angepasst. Diese Organismen leben parasitär, da sie über die Flüssigkeiten Nahrung in Form von vielen bereits aufgespaltenen Nährstoffen aufnehmen. Um an die Flüssigkeit zu gelangen und um sie aufzunehmen, haben die Tiere spezielle Stech- und Saug-Mundwerkzeuge.

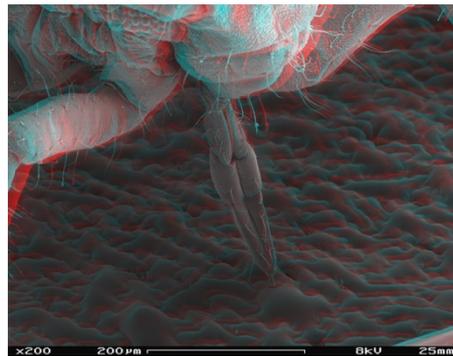
Tiere, die sich an Pflanzensäften bedienen, sind beispielsweise Blattläuse. Tiere die Blutflüssigkeit erbeuten, sind zum Beispiel Zecken oder Milben.



**Abb. 4.9: Grüne Pfirsichblattlaus (geflügelt)**

*Myzus persicae*

Bild: Bauer, o. J.



**Abb. 4.10: Blattlauskopf REM**

Bild: SecretDisc, 2008

## 4.2 Verdauung und Stoffwechsel

### 4.2.1 Grundbegriffe Verdauung

#### (A) Verdauung

Nicht alle Nährstoffe, die aufgenommen werden, können die Darmwand passieren. Dies liegt daran, dass manche Stoffe (Makromoleküle) hierfür zu groß sind. Andere Stoffe, wie  $H_2O$ , Salze und Vitamine, können direkt über die Darmwand aufgenommen werden. Der Prozess, bei dem große „Nahrungsbrocken“ in Mikromoleküle (Monomere) aufgespalten werden, wird als Verdauung bezeichnet. Die Aufspaltung (Zerkleinerung der Makromoleküle) findet sowohl mechanisch wie auch chemische statt. Bei der chemischen Aufspaltung sind viele Enzyme beteiligt. Die entstehenden Monomere sind: Aminosäuren, Monosaccharide, kurzkettige Fettsäuren. Langkettige Fettsäuren werden eingebunden in Triglyceride aufgenommen und nicht als Monomere.

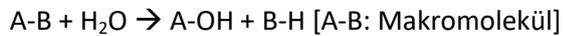
#### (B) Nährstoffe

Als Nährstoffe werden alle organischen und anorganischen Stoffe bezeichnet, die Organismen zur Aufrechterhaltung ihres Lebens benötigen. Die Nährstoffe sind: Kohlenhydrate (Poly-, Oligo-, Di- und Monosaccharide), Lipide (Fette), Proteine (Eiweiße), Wasser ( $H_2O$ ), Mineralstoffe und Vitamine. In

mancher Literatur wird auch eine andere Definition dargestellt, bei der unter Nährstoffen nur Stoffe aufgeführt werden, die im Stoffwechsel zur Energiegewinnung verwendet werden können.

### **(C) Verdauungsenzyme**

Verdauungsenzyme sind Proteine, die das Aufspalten von einem Makromoleküle in zwei kleinere Moleküle katalysieren (ermöglichen), dabei wird ein Molekül  $H_2O$  benötigt:



Die Makromoleküle werden so lange mithilfe von Verdauungsenzymen aufgespalten, bis Monomere (Aminosäuren, Monosaccharide, Fettsäuren) entstanden sind, die über den Darm aufgenommen werden können. Enzyme (egal welcher Art) arbeiten spezifisch, was bedeutet, dass sie nur spezifische Makromoleküle und diese nur an spezifischen chemischen Bindungen aufspalten können.

## **4.2.2 Verdauung**

Die Verdauung kann, je nach Organismus, intrazellulär oder extrazellulär stattfinden. Bei einigen Organismen gibt es auch Mischformen.

### **(A) Intrazelluläre Verdauung**

Eine intrazelluläre Verdauung findet man beispielsweise bei Einzellern oder Schwämmen. Bei der intrazellulären Verdauung handelt es sich um eine Phagozytose (siehe Abb. 4.3). Hierbei wird ein Nahrungsteilchen durch Einstülpung der Plasmamembran und folgende Verschließung und Abschnürung der Plasmamembran ins Cytoplasma aufgenommen (vergleiche Endocytose). Die so gebildete Nahrungsvakuole wird Phagosom genannt. Das Phagosom verschmilzt mit einem Lysosom (gebildet im Golgi-Apparat), das durch die Verschmelzung entstehende Gebilde heißt Phagolysosom. Durch die Enzyme, die im Lysosom enthalten waren, beginnt die Verdauung des Nahrungsteilchens im Phagolysosom. Die freiwerdenden Nährstoffe werden über die Membran des Vesikels durch Transportvorgänge aus dem Phagolysosom ins Cytoplasma befördert. Unverdauliches im Phagolysosom wird am Ende des Verdauungsprozesses über Exocytose ausgeschieden.

Die Nachteile dieser Art der Verdauung sind:

- jede Zelle muss alle Enzyme für alle Nährstoffe selbst herstellen,
- es können nur kleine Nahrungsbrocken aufgenommen werden.

### **(B) Extrazelluläre Verdauung**

Bei der extrazellulären Verdauung handelt es sich um eine Verdauung, die in einem Verdauungskanal (dies ist so bei einer Großzahl der Tiere) oder bei manchen Organismen auch teilweise außerhalb des Körpers und nicht im Verdauungskanal stattfindet. Strenggenommen gehört der Innenraum des Darms (Darmlumen) auch zur Außenwelt. Im Verdauungskanal werden nach der Aufspaltung der Nahrung in die Monomere diese über die Zellen der Darmschleimhaut aufgenommen.

Die Vorteile dieser Art von Verdauung sind:

- es ist die Aufnahme von großen Nahrungsbrocken möglich,
- spezifische Zellen können spezifische Enzyme produzieren und diese in den Verdauungskanal geben,
- spezifische Zellen sind für die Resorption der Mikromoleküle zuständig, dies ermöglicht eine kontrollierte Aufnahme in den Körper.

Bei den Wirbeltieren (vergleiche Abb. 4.11) kann man den Verdauungskanal grob in Mund, Speiseröhre, Magen, Dünndarm, Dickdarm und After untergliedern. Im Mund befinden sich Speicheldrüsen und bei vielen Wirbeltieren Zähne. Die Zähne sind für die Zerkleinerung der Nahrung zuständig. Die

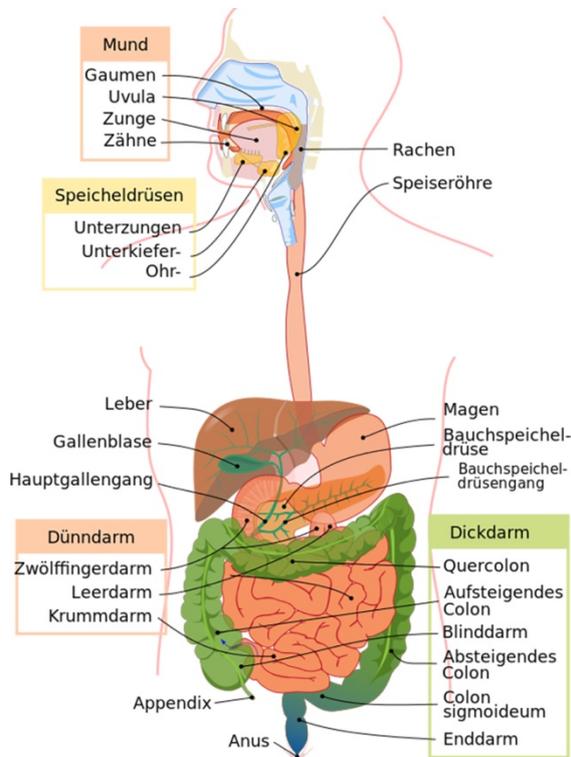


Abb. 4.11: Verdauungskanal Säugetier (Mensch)

Bild: Ruiz, 2007

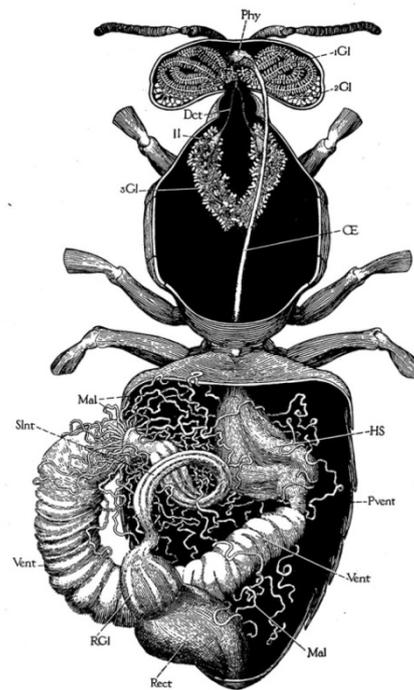


Abb. 4.12: Verdauungskanal Insekten (Honigbiene)

HS: Magen; Vent: Mitteldarm; Sint: Enddarm

Bild: Snodgrass, 1910

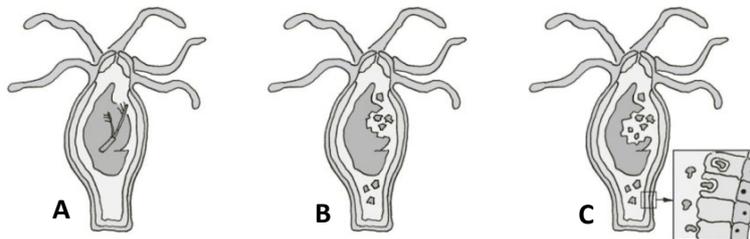
Speicheldrüsen sorgen durch Zugabe von Wasser für die Bildung eines Speisebreis und fügen zudem noch Enzyme ( $\alpha$ -Amylase) hinzu, die die Aufspaltung von Stärke und Glykogen bewirken. Die Speiseröhre transportiert den Nahrungsbrei in den Magen. Der Magen dient der Speicherung, kontrolliert die Abgabe von Nahrungsbrei in den Darm und ist eine Barriere für Krankheitserreger. Zudem erfolgen Teilprozesse der Verdauung von Proteinen im Magen. Bei manchen Wirbeltieren finden auch mechanische Zerkleinerungsprozesse im Magen statt (Kaumagen bei Vögeln). Im Dünndarm werden die Makromoleküle aufgespalten, bis Monomere entstanden sind. Hierzu werden Enzyme aus der Bauchspeicheldrüse und der Darmschleimhaut ins Darmlumen abgegeben. Im Dünndarm werden über die Darmwand zudem die Monomere aufgenommen. Im Dickdarm findet die Resorption von Wasser statt. Über den After werden unverdauliche Bestandteile wieder abgegeben.

Bei den wirbellosen Tieren (*Invertebraten*) ist der Verdauungskanal ähnlich dem der Wirbeltiere aufgebaut (vergleiche Abb. 4.12). Anstelle des Dünndarms gibt es aber einen Mitteldarm, der funktional dem Dünndarm entspricht, und anstelle des Dickdarms gibt es einen Enddarm, der funktional dem Dickdarm entspricht.

### (C) Mischform

Bei manchen Tieren gibt es auch eine Mischung aus extrazellulärer und intrazellulärer Verdauung. Bei diesen Tieren wird bei der extrazellulären Verdauung die Nahrung in kleine Brocken zerkleinert und

danach über Phagocytose in die Zellen aufgenommen und dort vollständig verdaut. Beispiele für diese Organismen sind die Nesseltiere (*Cnidaria*) oder Plattwürmer (*Plathelminthes*).



**Abb. 4.13: Verdauung bei einem Süßwasserpolyphen**

**A:** Beute wird in Verdauungstrakt (Gastrovaskularsystem) aufgenommen

**B:** Verdauungsenzyme werden in den Verdauungstrakt abgegeben und zerkleinern die Beute

**C:** Über Phagocytose werden Nahrungsbrocken aufgenommen und intrazellulär verdaut

Bild: Baur, 2005

### 4.2.3 Stoffwechsel (Metabolismus)

Der Stoffwechsel kann in den Baustoffwechsel (Stoffwechsel zum Erhalt der Körpersubstanz), Energiestoffwechsel (Umwandlung in nutzbare Energie) und Nutzung/Bildung von Wirkstoffen (z. B. Nutzung von Vitaminen oder Bildung von Hormonen) untergliedert werden.

Beim Energiestoffwechsel, der nachfolgend exemplarisch mit dem Abbau von Glucose erklärt wird, finden unterschiedliche Teilprozesse statt:

#### **(A) Glykolyse**

Der erste Schritt beim Abbau von Glucose zur Energiegewinnung heißt Glykolyse. Die Glykolyse findet im Cytoplasma der Zelle statt. Beim Stoffwechselprozess der Glykolyse wird ein Molekül Glucose in zwei Moleküle Pyruvat aufgespalten, hierbei werden zwei Moleküle ADP zu zwei Molekülen ATP umgebaut ( $2 \text{ ADP} + 2 \text{ P}_i \rightarrow 2 \text{ ATP}$ ) und vier Elektronen und vier Wasserstoffatome, die ursprünglich aus der Glucose stammen, werden an zwei Moleküle  $\text{NAD}^+$  angelagert ( $2 \text{ NAD}^+ + 4 \text{ H}^+ + 4 \text{ e}^- \rightarrow 2 \text{ NADH} + \text{H}^+$ ).

#### **(B) Oxidative Decarboxylierung**

Nach der Glykolyse wandern die entstandenen Pyruvat- und  $\text{NADH} + \text{H}^+$ -Moleküle in die Mitochondrien. In den Mitochondrien findet die oxidative Decarboxylierung statt. Beim Prozess wird von dem C3-Körper des Pyruvats ein C-Atom in Form von  $\text{CO}_2$  und ein H-Atom ( $\text{H}^+ + \text{e}^-$  das an  $\text{NAD}^+$  gebunden wird) abgetrennt. Aus dem Pyruvat wird Acetyl-CoA.

#### **(C) Zitronensäurezyklus**

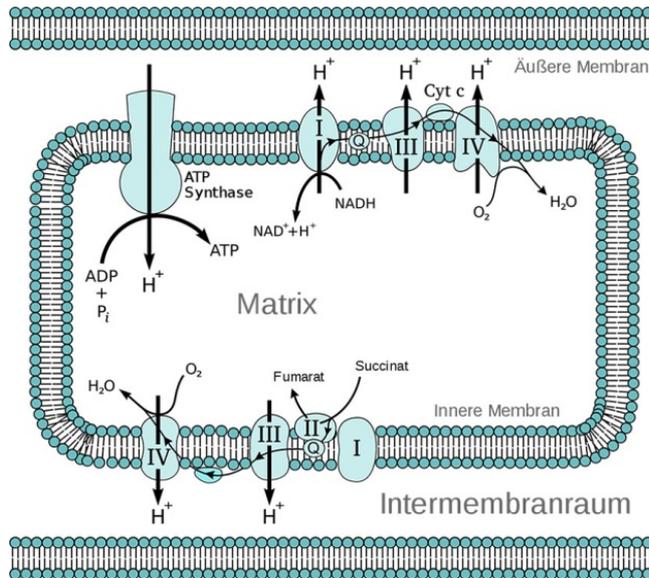
Acetyl-CoA wird im Zitronensäurezyklus, der ebenfalls in den Mitochondrien stattfindet, weiter verstoffwechselt. In einer zyklisch nacheinander ablaufenden Reaktionskaskade wird das Acetyl-CoA-Molekül komplett abgebaut. Beim Abbau entstehen  $2 \text{ CO}_2$ ,  $1 \text{ ATP}$  wie auch  $3 \text{ NADH} + \text{H}^+$  und  $1 \text{ FADH}_2$ .

#### **(D) Atmungskette**

In der Atmungskette (Redoxreaktionen), welche wiederum ebenfalls in den Mitochondrien abläuft, findet die Endoxidation statt (siehe auch Kapitel 1 und 3 zur Atmungskette). Hierbei reagieren die  $\text{e}^-$ , die von den  $\text{NAD}^+$ - und  $\text{FAD}$ -Molekülen aufgenommen wurden, mit Bestandteilen der inneren Membran der Mitochondrien. Durch diese Reaktionen wird  $\text{H}^+$  in den Intermembranraum gepumpt, was zu einem Konzentrationsgefälle führt (mehr  $\text{H}^+$  im Intermembranraum, weniger im Innenraum der Mi-

tochondrien). Durch das Zurückströmen der  $H^+$ -Ionen (Diffusion) kommt es an der ATP-Synthase zur Bildung von ATP aus ADP und  $P_i$ .

Werden die anderen Monomere im Energiestoffwechsel abgebaut, werden sie zuerst zu Molekülen umgebaut, die an irgendeiner Form in die Glykolyse, in die oxidative Decarboxylierung oder in den Zitronensäurezyklus einfließen können.



**Abb. 4.14: Atmungskette**

- (I) NADH-Hydrogenase
- (II) Ubichinon-Oxidoreduktase
- (Q) Ubichinon
- (III) Cytochrom-b-c<sub>1</sub>-Komplex
- (Cyt c) Cytochrom c
- (IV) Cytochrom-Oxidase-Komplex

Bild: Hoffmeier, 2007, verändert



## Nachbereitung / Übung

### Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

Aminosäure	Enzym	NAD <sup>+</sup>
Baustoffwechsel	Herbivore	Nährstoffe
Beutegreifer	Metabolismus	Omnivore
Carnivore	Monomer	Weidegänger
Energiestoffwechsel	Monosaccharid	

### Aufgabe 2:

- (1) Unterscheiden Sie Verdauung und Stoffwechsel.
- (2) Unterscheiden Sie Parasiten von anderen Tieren.
- (3) Führen Sie die Nahrungserwerbsstrategien auf und vergleichen Sie diese.
- (4) Zählen Sie die Gruppen der Nährstoffe auf.
- (5) Unterscheiden Sie Nahrung, Nährstoffe, Monomere.
- (6) Welche Stoffe können über die Darmwand aufgenommen werden?
- (7) Stellen Sie die intrazelluläre und extrazelluläre Verdauung gegenüber.
- (8) Nennen Sie wesentliche Organe des Verdauungskanal und führen Sie deren Funktion auf.
- (9) Welche Stoffe werden bei der Glykolyse, oxidativen Decarboxylierung und im Zitronensäurezyklus frei?

----

### 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* (13., aktualisierte Auflage [der engl. Ausg.]). München: Pearson Education.
- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (8. Auflage Heidelberg: Springer Spektrum.
- Munk, K. (2011). *Zoologie*. 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 4.1: **Eichelhäher frisst Nuss**. Bild von: Oldiefan; 2018; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/tier-vogel-eichelhäher-3053155/>

Abbildung 4.2: **Schweinebandwurm**. Ursprünglicher Bildtitel: Taenia solium; Bild von: unbekannt; 1823; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taenia\\_solium.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taenia_solium.jpg)

Abbildung 4.3: **Phagocytose und Verdauung bei Einzellern**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 4.4: **Röhrenwurm streckt Filtertentakel aus**. Ursprünglicher Bildtitel: Eudistylia polymorpha, ein Vertreter der Sabellida; Bild von: Chris Gotschalk; 2004; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Röhrenwurm#/media/Datei:Featherduster\\_300.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Röhrenwurm#/media/Datei:Featherduster_300.jpg)

Abbildung 4.5: **Grönlandwal**. Ursprünglicher Bildtitel: Briefmarke mit Grönlandwalmotiv von 1990; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faroe\\_stamp\\_198\\_Baleana\\_mysticetus.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faroe_stamp_198_Baleana_mysticetus.jpg)

Abbildung 4.6: **Filtrieren bei Bartwalen**. Ursprünglicher Bildtitel: Filtermechanismus der Bartwale; Bild von: Marinrnr; 2011; Lizenz: CC 0; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Whalefilter.png>

Abbildung 4.7: **Gewöhnlicher Wasserfloh**. Ursprünglicher Bildtitel: Daphnia pulex; Bild von: Paul Hebert; 2005; Lizenz: CC BY 2.5; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daphnia\\_pulex.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Daphnia_pulex.png)

Abbildung 4.8: **Chamäleon fängt Beute**. Bild von: Kolibri5; o. J.; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/chamäleon-afrika-namibia-landschaft-1170042/>

Abbildung 4.9: **Grüne Pfirsichtsblattlaus (geflügelt)**. Ursprünglicher Bildtitel: Grüne Pfirsichtsblattlaus; Bild von: Scott Bauer; o. J.; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Myzus\\_persicae.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Myzus_persicae.jpg)

Abbildung 4.10: **Blattlauskopf REM**. Ursprünglicher Bildtitel: REM-Anaglyphen-Darstellung von Blattläusen auf einer Blattunterseite, vergrößert 200x; Bild von: SecretDisc; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aphis\\_fabae\\_STEREO\\_b,\\_200x.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aphis_fabae_STEREO_b,_200x.JPG)

Abbildung 4.11 **Verdauungskanal Säugetier (Mensch)**. Ursprünglicher Bildtitel: The gastrointestinal tract; Bild von: Mariana Ruiz; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Verdauung#/media/Datei:Digestive\\_system\\_diagram\\_de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Verdauung#/media/Datei:Digestive_system_diagram_de.svg)

Abbildung 4.12: **Verdauungskanal Biene**. Ursprünglicher Bildtitel: Alimentary canal of worker; Bild aus: Snodgrass, R. E. (1910). The Anatomie of the Honey Bee. Washington: Government Printing Office, S. 85.

Abbildung 4.13: **Verdauung bei Süßwasserpolyp**. Bild von: Armin Baur; 2005.

Abbildung 4.14: **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](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mitochondriale_Elektronentransportkette.svg); verändert.

## 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 Tier 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 darstellen;
  - die Aufgabe eines passiven Bewegungsapparats erklären;
  - die verschiedene Formen eines passiven Bewegungsapparats erläutern;
  - 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, dieser Kraft muss mit Muskularbeit und mithilfe von Tragflächen entgegengewirkt werden. Für beides haben sich im Laufe der Evolution bei vielen fliegenden Tieren Flügel entwickelt. Zudem muss für den Vortrieb der Luftwiderstand überwunden werden, was mithilfe von einer aerodynamischen Form möglich ist. Es gibt aber auch andere



**Abb. 5.2: Anpassung ans Fliegen am Beispiel Vögel**

Gaugans (*Anser anser*)

Bild: Stirnweis, 2012

Strategien zum Fliegen, so nutzen viele Spinnen ihr geringes Gewicht und lassen sich an einem Spinnfaden durch Luftströmungen verdriften. Der Faden wirkt hierbei wie ein Segel oder ein Fallschirm.

- **Schwimmen:** Tiere, die sich schwimmend fortbewegen, müssen den Wasserwiderstand überwinden, um nicht zu viel Energie zu verbrauchen. Auch sie sind aerodynamisch gebaut. Meist haben schwimmende Tiere Ruderorgane (Flossen, Ruderschwänze etc.) zum aktiven Vortrieb oder sie lassen sich von der Wasserströmung treiben. Tiere, die der Wasserströmung entgegenwirken und ihre Schwimmrichtung frei wählen können, gehören zum Nekton. Tiere, deren Richtung von der Wasserströmung bestimmt wird, gehören zum Plankton. Schwimmen kann im Wasser oder unter Wasser (Tauchen) erfolgen. Einige Tiere sind auch in der Lage, im Wasser zu schweben, was bedeutet, dass sie eine Position in der Wassersäule einnehmen und dort ohne aktive Bewegung verweilen können, ohne auf den Grund zu sinken. Zum Schweben besitzen die Knochenfische eine Schwimmblase, andere Organismen lagern Öle oder Gase im Körper an bzw. bauen dies ab, um wieder zu sinken.
- **Kriechen:** Kriechen oder Robben ist eine Art der Fortbewegung, bei der der Bauch mit dem Boden in Berührung bleibt. Das **Schlängeln** ist eine spezielle Form des Kriechens. Viele Reptilien (Echsen, Krokodile, Schlangen) und Würmer und auch manche Amphibien (Schwanzlurche, Blindwühlen) bewegen sich kriechend fort.
- **Gehen:** Das eigentliche Gehen ist definiert als Fortbewegung mithilfe von Extremitäten, die nicht alle gleichzeitig den Kontakt mit dem Boden verlieren. Das Gehen kann in unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen und wird oft noch dementsprechend in Schreiten (langsames Gehen) oder Gehen unterschieden.
- **Laufen:** Beim Laufen bewegen sich Tiere mithilfe von Extremitäten fort, die auch kurzzeitig alle den Bodenkontakt verlieren können.
- **Springen:** Zum Springen setzen Tiere Muskelkraft ein, um Höhe, Weite oder Tiefe zu überwinden. Tiere, die sich springend fortbewegen, haben oft eine gute Sprungmuskulatur ausgebildet.



**Abb. 5.3: Kriechen – Laufen – Springen**

(A) Kriechendes Krokodil: Majetic, 2015

(B) Laufendes Pferd: Candice, 2018

(C) Springende Gams: rotonnara, 2019



**Abb. 5.4: Anpassung ans Graben am Beispiel Maulwurf**

Maulwurf (*Talpa europaea*)

Bild: Schumacher, 2012

- **Grabern:** Einige Tiere bewegen sich unter der Erde bzw. im Sediment der Meere (Sand) fort. Um in Höhlen oder Gängen zu leben, muss der Körper so gebaut sein, dass keine Körperanhänge das schnelle Durchlaufen der Gänge bzw. das Anlegen/Bauen von Gängen beeinträchtigen. Oft sind eine konische (kegelförmige) Körperform und Graborgane vorhanden.
- **Klettern:** Beim Klettern überwinden Tiere Höhen oder Tiefen, sie klettern an Bäumen und anderen Pflanzen, an Felsen oder an der Oberfläche anderer tierischer Organismen. Tiere, die klettern, haben hierfür Extremitäten oder andere Organe zum Festhalten. Ein Haftorgan von Insekten, mit dem sie sich an glatten Flächen festkleben können, ist das Arolium (Haftpolster). Am Arolium wird eine klebrige Substanz produziert, die die Haftung mit dem glatten Untergrund ermöglicht. Bei rauen Untergründen werden Krallen eingesetzt (siehe Abb. 5.5).



**Abb. 5.5: Haftorgane Stabschrecke**  
Vietnam-Stabschrecke (*Ramulus artemis*)

Bild: Baur, 2015

### (B) Sessil

Sessile Tiere, sind Tiere, die ihren Standort nicht verlassen können. Es handelt sich um festgewachsene bzw. fest verankerte Tiere. Sessile Tiere findet man nur in aquatischen Lebensräumen. Häufig sind die Larven von sessilen Tieren frei beweglich und können dadurch neue Standorte besiedeln.

Beispiele für sessile Tiere sind Manteltiere (Tunikaten *Tunicata*), Korallen und Seeanemonen (*Anthozoa*), Schwämme (*Porifera*) oder Seepocken (*Balanidae*).



**Abb. 5.6: Seepocken**

Bild: Aomorikuma, 2009



**Abb. 5.7: Tunikatenkolonie**

*Clavelina moluccensis*

Bild: Nhobgood, 2005



**Abb. 5.8: Vasenschwämme**

Bild: Kok, 2007

### (C) Halbsessil

Halbsessile Tiere sind festsitzende Tiere, die ihren Standort aber dennoch aktiv (wenn auch mühsam) durch Fortbewegung verändern können. Süßwasserpolyphen (*Hydra*) sind halbsessile Tiere. Sie können durch einen Überschlag („Purzelbaum“) oder durch eine raupenartige Bewegung von der Stelle kommen. Beim Überschlag senkt sich der Mundbereich mit dem Tentakelkranz zum Grund und die Fußscheibe löst sich, nach dem Überschlag heftet sich der Polyp erneut fest und beginnt den nächsten Überschlag. Dies erfolgt so lange, bis der neue Standort erreicht ist.

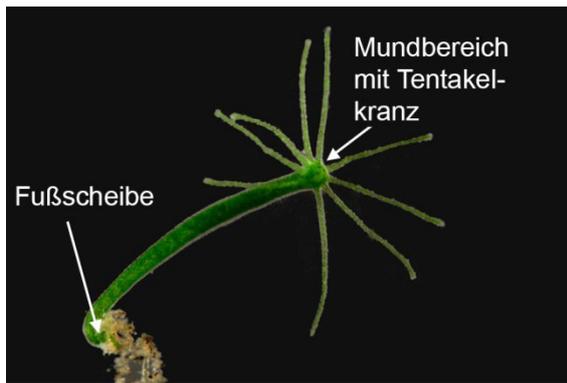


Abb. 5.9: Süßwasserpolyp

*Hydra viridissima*

Bild: Fox, 2012

## 5.2 Bewegungsapparat

Der Bewegungsapparat besteht aus einem passiven Teil und einem aktiven Teil. Der passive Teil ist partiell starr und wird bewegt. Der aktive Teil ist muskulär und verändert bei der Längsmuskulatur durch Kontraktion seine Länge bzw. bei der Ringmuskulatur den Durchmesser.

### 5.2.1 Passiver Bewegungsapparat

Der passive Bewegungsapparat besteht aus den folgenden Elementen: Skelett, Gelenke und Bänder.

#### (A) Skelett

Ein Skelett ist ein stabiles, aber dennoch bewegliches Gebilde, das meist einen Ansatz für die Muskeln und den Teil des Bewegungsapparates, der im eigentlichen Sinn bewegt wird, darstellt. Häufig übernimmt ein Skelett auch den Schutz von Organen. Man kann unterschiedliche Skeletttypen unterscheiden:

#### (A-1) Hydroskelett

Ein Hydroskelett funktioniert Dank der Inkompressibilität des Wassers. Organismen mit einem Hydroskelett

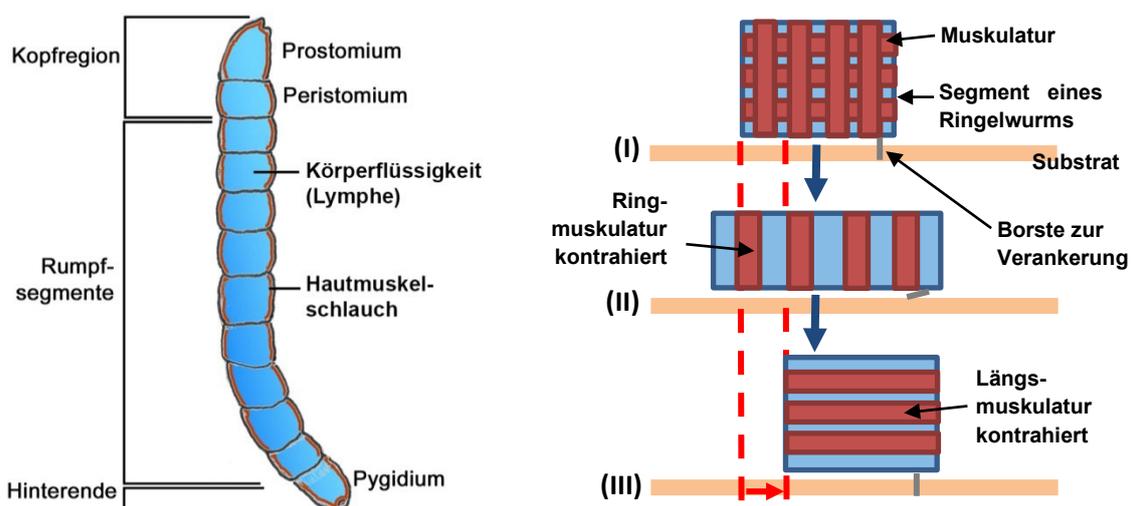


Abb. 5.10: Hydroskelett Ringelwurm

Der Hautmuskelschlauch von Ringelwürmern besteht aus Längs- und Ringmuskulatur.

Kontrahiert die Ringmuskulatur (II) wird das Segment im Querschnitt dünner, dafür aber länger. Bei der Fortbewegung arbeiten die Ringelwürmer mit dieser Längsstreckung der Segmente, sie lösen die Verankerung (Borsten) mit dem Boden, strecken einige Segmente, verankern diese wieder am Bodengrund und ziehen die Segmente mithilfe der Längsmuskulatur wieder zusammen (III), danach strecken sie sie dann wieder.

Bild: Baur, 2019

roskelett verwenden ihre Körperflüssigkeit (z. B. Ringelwürmer *Annelida*) oder Umgebungswasser, das sie in einer Körperhöhle einschließen (z. B. Nesseltiere *Cnidaria*), und bringen diese Flüssigkeit mithilfe von Muskulatur, die um die Flüssigkeit liegt (z. B. Hautmuskelschlauch bei den Ringelwürmern; siehe Abb. 5.10), unter Druck. Da Wasser sich nur in sehr geringem Maße zusammendrücken lässt, muss sich zwangsweise die Form der Organismen verändern (siehe Abb. 5.10). Diese Formänderung wird zum Ausstrecken und Beugen des Körpers oder von Körperteilen verwendet, was auch zur Fortbewegung dient.

### (A-2) Exoskelett

Gliederfüßer (*Arthropoda*) wie Spinnen, Tausendfüßer, Krebse und Insekten, etliche Weichtiere (*Mollusca*) wie Schnecken und Muscheln und Manteltiere (*Tunicata*) haben ein Außenskelett (Exoskelett). Das Exoskelett umschließt den Körper bzw. Teile des Körpers (beispielsweise ein Schneckenhaus). Es wird von den Zellen der Epidermis gebildet. Wird der Körper komplett vom Exoskelett umschlossen, muss dieses zum Wachstum abgelegt und anschließend erneuert werden (Häutung). Das Exoskelett von Gliederfüßern ist aus Chitin und Proteinen aufgebaut, das Exoskelett der Weichtiere aus Kalziumverbindungen und Proteinen. Gehäuseschnecken haben eigentlich zwei Skeletttypen; sie haben ein Exoskelett (Schneckenhäuschen) und arbeiten zum Einziehen in und Ausstrecken aus dem Häuschen mit einem Hydroskelett. Beim Exoskelett der Manteltiere werden von der Epidermis Cellulose und Proteine abgegeben, die das Skelett bilden.

Bei den Gliederfüßern wird an den zur Cuticula grenzenden Mikrovillis das Chitin (Polysaccharid) synthetisiert. Die Bestandteile des Chitins werden in der Zelle aufgebaut. Proteine gelangen aus der Hämolymphe über die Epidermiszellen in die Cuticula. Das Wachs der Cuticulinschicht wird in den Oenocyten (spezielle Zellen) gebildet.

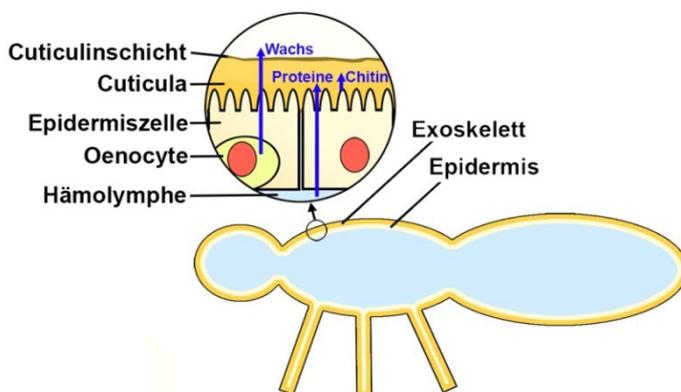


Abb. 5.11: Exoskelett von Gliederfüßern (*Arthropoda*)

Bild: Baur, 2019

### (A-3) Endoskelett

Wirbeltiere (*Vertebrata*) und Stachelhäuter (*Echinodermata*) besitzen ein inneres Skelett (Endoskelett). Wirbeltiere haben Knorpelzellen oder Knochenzellen und Knorpelzellen, die ein Skelett bilden. Bei den Wirbeltieren wird jede Knochenzelle (Osteocyt) von einer Kollagenmatrix umgeben, in die ein Salz aus den Ionen Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) und Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) eingelagert ist. Die Kollagenmatrix wird von Osteoblasten gebildet, die sich danach zu den Osteocysten umbilden. Osteoklasten bauen



Abb. 5.12: Skelett Frosch

Bild: Baur, 2019

nicht benötigte Knochenzellen wieder ab. Die Knochen sind durch die Kollagenmatrix und die eingelagerten Ionen sehr stabil und fest. Knorpelzellen bilden Knorpelgewebe, welches ein festes, aber biegsames Gewebe ist. Knorpelzellen (Chondrocyten) sind von Kollagen und elastischen Fasern umgeben, diese werden von Chondroblasten gebildet, die sich danach zu Chondrocyten umbilden. In die Matrix der Chondrocyten sind Wasser, Proteoglycane und Hyaluronsäure eingelagert. Das Skelett der Wirbeltiere befindet sich zentral im Inneren des Körpers. Die Stachelhäuter (Seesterne, Seeigel, Seeurken etc.) bilden hingegen direkt unter der Epidermis, daher aber im Körperinneren, Knochenplatten (Stereome), die dem Körper als Schutz und passiver Bewegungsapparat dienen.

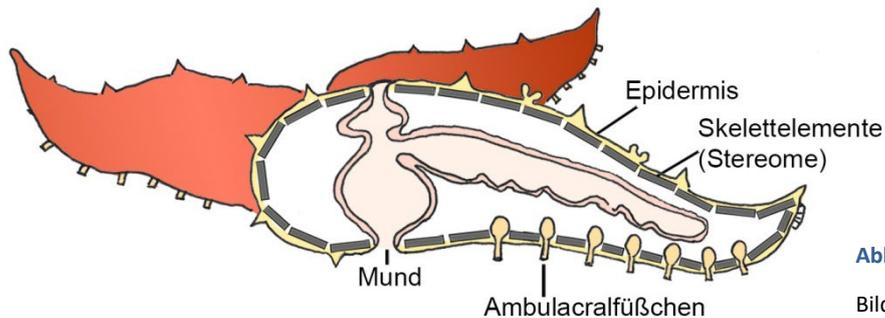


Abb. 5.13: Skelett Seestern

Bild: Baur, 2019

### **(B) Gelenke**

Gelenke gibt es sowohl bei einem Exo-, wie auch bei einem Endoskelett, nicht jedoch beim Hydroskelett. Beim Exoskelett sind Bereiche des Skeletts nicht verfestigt (nicht sklerotisiert) und ermöglichen als elastische Gelenkmembrane Bewegung. Beim Endoskelett der Wirbeltiere kann man zwischen echten und unechten Gelenken unterscheiden. Echte Gelenke (z. B. Kniegelenk) besitzen einen flüssigkeitsgefüllten Gelenkspalt und eine das Gelenk umgebende Membran (Gelenkkapsel), wohingegen die Knochen bei unechten Gelenken mit einem Füllgewebe (z. B. Knorpel, Bindegewebe) verbunden sind (z. B. Verbindung der Wirbel der Wirbelsäule; verbunden durch Bandscheiben). Die echten Gelenke können in unterschiedliche Gelenktypen untergliedert werden (siehe Abb. 5.14). Der Gelenktyp gibt die Bewegungsmöglichkeit vor. So können mit einem Kugelgelenk kreisende und beugende Bewegungen ausgeführt werden, wohingegen mit einem Zapfengelenk nur Drehbewegungen möglich sind.

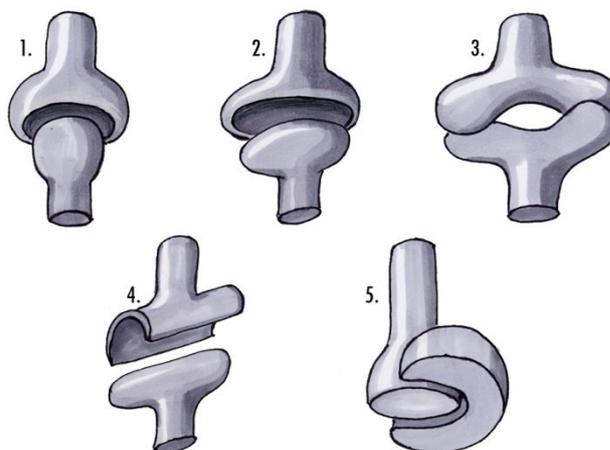


Abb. 5.14: Gelenktypen echte Gelenke

- (1) Kugelgelenk
- (2) Eigelenk
- (3) Sattelgelenk
- (4) Scharniergelenk
- (5) Zapfengelenk

Bild: Produnis, 2005

### **(C) Bänder**

Bänder bestehen überwiegend aus Kollagen und verbinden Knochen eines Gelenks untereinander.

### 5.2.2 Aktiver Bewegungsapparat

Der aktive Bewegungsapparat besteht aus Muskeln und Sehnen. Sehnen sind aus Kollagenfasern aufgebaut und dadurch zugfest. Die Sehnen verbinden die Muskeln mit dem Skelett. Die Muskeln des Bewegungsapparates sind gestreift. Es gibt quergestreifte Muskulatur (beispielsweise bei Insekten und Wirbeltieren; siehe Abb. 5.17) und diagonalgestreifte Muskulatur (beispielsweise bei Ringelwürmern). Die Streifung resultiert aus der Anordnung von Actin- und Myosinstrukturen. Ein Muskel besteht aus vielen Muskelzellen. Muskelzellen sind sehr lange Zellen, die durch eine Verschmelzung von Zellen entstanden sind. Die Muskelzellen nehmen die Länge des Muskels ein. Aufgrund der Länge werden Muskelzellen auch als Muskelfasern bezeichnet. Ein Muskel besteht aus vielen Muskelfaserbündeln (siehe Abb. 5.15). Ein Muskelfaserbündel setzt sich aus vielen Muskelfasern zusammen. Eine Muskelfaser setzt sich wiederum aus vielen Myofibrillen zusammen. Eine Myofibrille ist wie eine Perlenkette aus vielen Sarkomeren aufgebaut. Ein Sarkomer setzt sich aus Myosin- und Actinfilamenten zusammen. Die Actinfilamente sind an einer Z-Scheibe festgemacht. Die Z-Scheiben stellen die Grenzen der Sarkomere dar. Die Myosinfilamente liegen zwischen den Actinfilamenten (siehe Abb. 5.15).

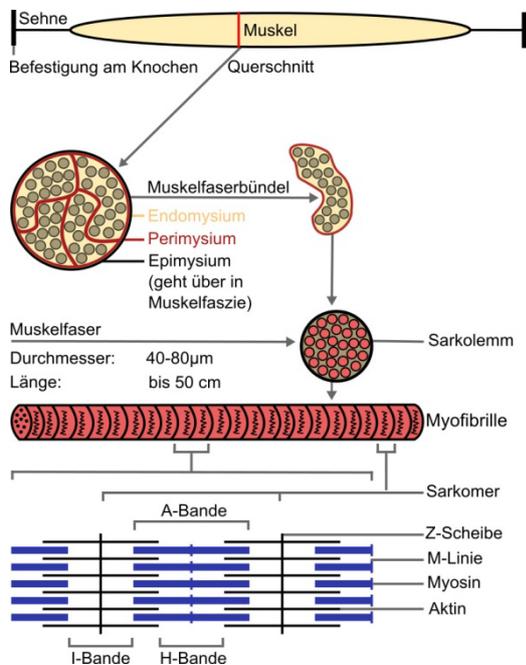
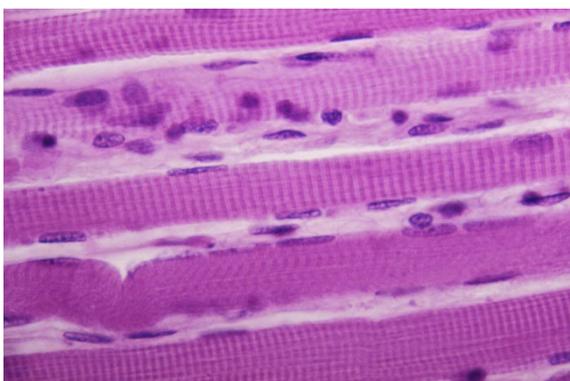
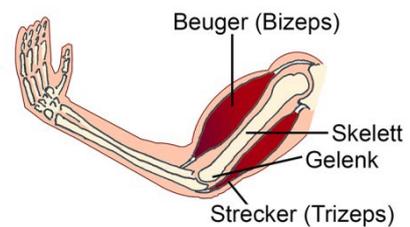


Abb. 5.15: Bau Muskel

Bild: Schmid, 2010



(1) Endoskelett Wirbeltier



(2) Exoskelett Insekt

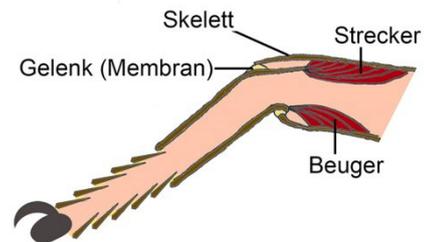


Abb. 5.16: Exo- und Endoskelett im Vergleich

Bild: Baur, 2019

Abb. 5.17: Quergestreifte Muskulatur

Bild: Rollrobooter, 2013

Bewegung kommt – wie bereits erwähnt – durch das Kontrahieren von Muskeln zustande, wodurch der passive Bewegungsapparat bewegt wird. Die Bewegungsrichtung wird von den Gelenken vorherbestimmt. Die Muskelkontraktion kann mit der **Gleitfilamenttheorie** erklärt werden. Zu Aktivierung der Kontraktion muss ein Impuls von Motoneuronen in Form von Neurotransmittern (Acetylcholin) die Muskelzelle (Muskelzelle) erreichen. Hierdurch entsteht an der Muskelzelle ein Aktionspotenzial, das zum Ausschleiden von Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) aus dem sarkoplasmatischen Retikulum führt. Das sarkoplasmatische Retikulum ist eine für Muskelzellen spezifische Abwandlung des Retikulums (siehe Kapitel 1). Wird Calcium in das Cytoplasma entlassen, verbindet sich dieses mit dem Troponinkomplex des Tropomyosins, welches am Actin gelegen ist. Durch die Bindung verändert sich die Lage des Tropomyosins und die Bindungsstellen für die Myosinköpfchen werden frei. Erst jetzt kann der Muskel kontrahieren. Insgesamt wird die Kontraktion durch Rückverlagerung und Ausscheidung von  $\text{Ca}^{2+}$  ins und aus dem sarkoplasmatischen Retikulum gesteuert. Schon bereits vor der Kontraktion haben sich ATP-Moleküle mit den Myosinköpfchen (je ein ATP pro Köpfchen) verbunden (Abb. 5.18 [1]). Durch die Anbindung wird die Anhaftung des Myosinköpfchens an das Actin gelöst (Abb. 5.18 [2]). Ist wenig  $\text{Ca}^{2+}$  im Cytoplasma, werden die Bindungsstellen (Bindungsstellen Actin-Myosinköpfchen) nun durch das Tropomyosin verlegt. Am Myosinköpfchen trennt sich nun ATP zu ADP und  $\text{P}_i$ . Beide Moleküle sind aber noch mit dem Myosinköpfchen verbunden. Durch diese Aufspaltung verändert sich die Form des Myosinköpfchens (Abb. 5.18 [3]). Sind die Bindungsstellen am Actin frei ( $\text{Ca}^{2+}$  im Cytoplasma und verbunden mit dem Troponinkomplex des Tropomyosins), verbinden sich die Myosinköpfchen mit dem Actin (Abb. 5.18 [4]). Durch die Verbindung der Myosinköpfchen mit dem Actin werden nun ADP und  $\text{P}_i$  vom Myosinköpfchen abgetrennt. Durch die Abtrennung des ADP und  $\text{P}_i$  nimmt das Myosinköpfchen wieder seine ursprüngliche Form an (Abb. 5.18 [5]). Durch den geschilderten Vorgang, der, solange  $\text{Ca}^{2+}$  im Cytoplasma ist, wieder und wieder stattfindet, zieht das Myosin die Actinfilamente zur Mittelachse des Myosins hin. Der Muskel kontrahiert. Wird das  $\text{Ca}^{2+}$  wieder ins sarkoplasmatische Retikulum transportiert, endet die Kontraktion. Die Muskelfaser muss dann wieder durch einen Antagonisten (entgegenwirkende Muskulatur; siehe Abb. 5.17) auseinandergezogen werden.

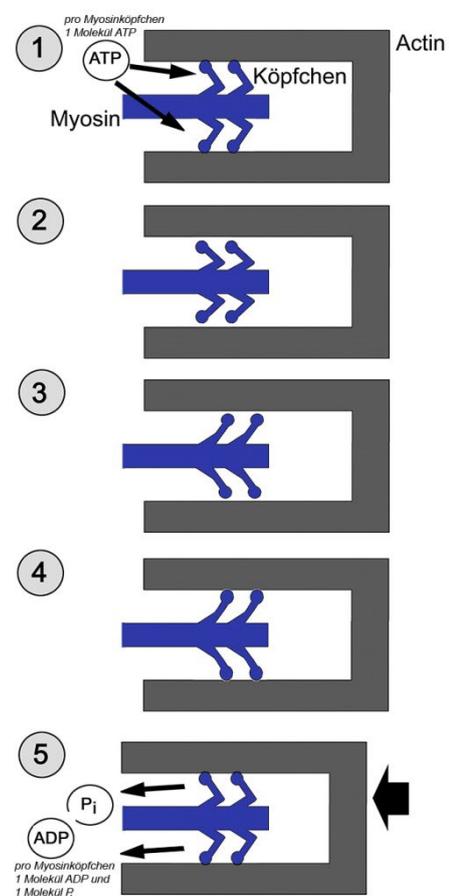


Abb. 5.18: Gleitfilamenttheorie

Bild: Baur, 2019



## Nachbereitung / Übung

### Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

Actin	Epidermis	Myosin
Antagonist	halbsessil	Osteocyt
ATP	Kontraktion	Ringmuskulatur
Cellulose	Längsmuskulatur	Sarkomer
Chitin	Mikrovilli	sessil
Chondrocyt	Muskulatur	vagil
Cuticula	Myofibrille	Z-Scheibe

### Aufgabe 2:

- (1) Welche Arten der Fortbewegung gibt es?
- (2) Aus welchen Teilbereichen setzt sich der Bewegungsapparat zusammen?
- (3) Führen Sie die Skeletttypen der Tiere auf und erläutern Sie, wie diese funktionieren.
- (4) Was sind die Aufgaben eines Skeletts?
- (5) Erläutern Sie, wie Knochen gebildet/aufgebaut werden [●].
- (6) Worin unterscheidet sich das Endoskelett der Wirbeltiere von dem der Stachelhäuter?
- (7) Welche Gelenkarten gibt es?
- (8) Erklären Sie die Vorgänge bei der Muskelkontraktion (Gleitfilamenttheorie). Gehen Sie hierbei auch detailliert auf die Steuerung mithilfe des Tropomyosins ein [●].

----

### 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.
- Dettner, K. & Peters, W. (2010). *Lehrbuch der Entomologie: Band 1* (2. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Hickman, C. P., Roberts, L. S., Larson, A., L'Anson, H. & Eisenhour, D. J. (2008). *Zoologie* (13., aktualisierte Aufl. [der engl. Ausg.]). München: Pearson.
- Munk, K. (2011). *Zoologie* (2., erweiterter Druck). Stuttgart: Georg Thieme.
- 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.
- Westheide, W. & Alberti, G. (2013). *Einzeller und wirbellose Tiere* (3. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.

## Abbildungen

Abbildung 5.1: **Fliegender Uhu**. Bild von: Alexa\_Fotos; 2017; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/eule-greifvogel-vogel-federn-2903707/>

Abbildung 5.2: **Anpassung ans Fliegen am Beispiel Vögel**. Bild von: Helmut Stirnweis; 2012; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/gänse-tiere-gans-wasser-schwimmen-348076/>; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 5.3-A: **Kriechendes Krokodil**. Bild von: Sabine Majetic; 2015; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/krokodil-reptil-alligator-tierwelt-3687036/>

Abbildung 5.3-B: **Laufendes Pferd**. Bild von: Candice Candice; 2018; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/tier-natur-feld-pferde-3066946/>

Abbildung 5.3-C: **Springende Gams**. Bild von: rotonara; 2019; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/gämse-springen-säugetier-alpen-4364301/>

Abbildung 5.4: **Anpassung ans Graben am Beispiel Maulwurf**. Bild von: Dirk Schumacher; 2012; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/maulwurf-natur-tiere-13298/>; Bild vom Autor verändert.

Abbildung 5.5: **Haftorgane Stabschrecke**. Bild von: Armin Baur; 2015.

Abbildung 5.6: **Seepocken**. Ursprünglicher Bildtitel: Seepocken und Miesmuscheln in Galicien; Bild von: Aomorikuma; 2009; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Seepocken#/media/Datei:Thoracida\\_Sessilia\\_Balanina\\_20090305.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Seepocken#/media/Datei:Thoracida_Sessilia_Balanina_20090305.jpg)

Abbildung 5.7: **Tunikatenkolonie**. 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](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bluebell_tunicates_Nick_Hobgood.jpg)

Abbildung 5.8: **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 5.9: **Süßwasserpolyp**. Ursprünglicher Bildtitel: Hydra viridissima; Bild von: Frank Fox; 2012; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Süßwasserpolypen#/media/Datei:Mikrofoto.de-Hydra\\_15.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Süßwasserpolypen#/media/Datei:Mikrofoto.de-Hydra_15.jpg); Bild vom Autor verändert.

Abbildung 5.10: **Hydroskelett Ringelwurm**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 5.11: **Exoskelett von Gliederfüßern (Arthropoda)**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 5.12: **Skelett Frosch**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 5.13: **Skelett Seestern**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 5.14: **Gelenktypen echte Gelenke**. Ursprünglicher Bildtitel: Echte Gelenke; Bild von: Produnis; 2005; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gelenk#/media/Datei:Gelenke\\_Zeichnung01.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Gelenk#/media/Datei:Gelenke_Zeichnung01.jpg)

Abbildung 5.15: **Bau Muskel**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematischer Aufbau eines Skelettmuskels; Bild von: Marc Schmid; 2010; Lizenz: CC BY 2.5; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Muskulatur#/media/Datei:Bauplan\\_der\\_Skelettmuskulatur.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Muskulatur#/media/Datei:Bauplan_der_Skelettmuskulatur.svg)

Abbildung 5.16: **Exo- und Endoskelett im Vergleich**. Bild von: Armin Baur; 2019.

Abbildung 5.17: **Quergestreifte Muskulatur**. Ursprünglicher Bildtitel: Lichtmikroskopisches Längsschnittbild quergestreifte Muskulatur; Bild von: Rollroter; 2013; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Muskulatur#/media/Datei:Muskel\\_\(1\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Muskulatur#/media/Datei:Muskel_(1).jpg)

Abbildung 5.18: **Gleitfilamenttheorie**. Bild von: Armin Baur; 2019.

## 6. Nervensysteme

Mehrzellige tierische Organismen mit echtem Gewebe besitzen neuronale Systeme (Nervensysteme), die aus Nervengewebe aufgebaut sind. Das Nervengewebe setzt sich aus zwei Zelltypen zusammen, den Neuronen (Nervenzellen) und den Gliazellen (Geleitzellen).

Neuronen sind für die Informationsweiterleitung und die Verarbeitung verantwortlich. Die Neuronen können sowohl in ihrer Funktion als auch nach ihrem Bau (Morphologie) unterschieden werden. (1) Unterscheidung nach Funktion: sensorische Neuronen (leiten Impulse von den Sinneszellen zur zentralen Verarbeitungseinheit), motorische Neuronen (leiten Impulse von der zentralen Verarbeitung zum Erfolgsorgan), Neuronen der Ganglien (zentrale Verarbeitungseinheiten). (2) Unterscheidung nach Bau: unipolare Nervenzellen, bipolare Nervenzellen, multipolare Nervenzellen, pseudounipolare Nervenzellen.

Je nach Tiergruppe (Wirbeltiere oder wirbellose Tiere) sind bei den Neuronen Myelinscheiden vorhanden oder diese fehlen.

Gliazellen haben im Vergleich zu den Neuronen sehr viel unterschiedlichere Funktionen (siehe unten 6.3). Den Gliazellen wurde bisher im Vergleich zu den Neuronen eine untergeordnete Rolle zugewiesen, wissenschaftliche Befunde zeigen auf, dass dies so nicht stimmig ist. Unsere Kenntnisse über Gliazellen sind aber längst noch nicht vollständig.

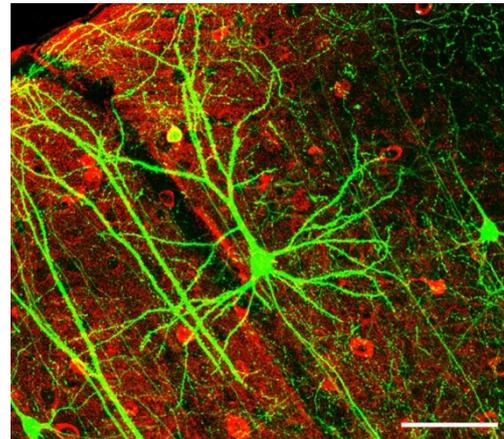
### - Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die Aufgaben eines Nervensystems erklären;
  - die Bestandteile eines Nervensystems darstellen;
  - die Anatomie eines Neurons erläutern;
  - die unterschiedlichen Nervensysteme erläutern;
  - die Teilprozesse beim Aktionspotenzial erklären.

### 6.1 Aufgaben eines Nervensystems

Ein Nervensystem hat unterschiedliche Aufgaben: die Steuerung der Vitalfunktionen, die Auswertung von Umweltreizen und die Generierung von Reaktion auf diese Reize sowie die Datenspeicherung.

- **Steuerung der Vitalfunktionen:** Bei vielen Tieren wird die Funktion von verschiedenen Organen durch Neuronen reguliert und damit die Vitalfunktion gesteuert. Es gibt auch autonome Organe (z. B. das Herz der Wirbeltiere), die sich selbst steuern, aber deren Steuerung über Nervenimpulse verändert werden kann (z. B. Erhöhung des Herzschlags bei Gefahr).
- **Reaktion auf die Umwelt:** Nicht nur die Vitalfunktionen, auch das Verhalten (Reaktion auf Umweltreize) wird über das Nervensystem entsprechend der eingehenden Umweltreize gesteuert.



**Abb. 6.2: Neuronen Großhirnrinde Maus**

Mikroskopische Aufnahme der Großhirnrinde einer Maus. Die Pyramidenzelle mit großem Dendritenbaum in der Bildmitte exprimiert hier grün fluoreszierendes Protein. Rot gefärbt sind GABA-produzierende Interneurone zu erkennen. (Länge des Maßstabs unten rechts: 100 µm).

Bild: Wei-Chung et al., 2005

- **Datenspeicherung:** Wichtige Verhaltensmuster, die erlernt oder angeboren sind, und gesammeltes Wissen werden über die Verschaltung von Neuronen gespeichert.

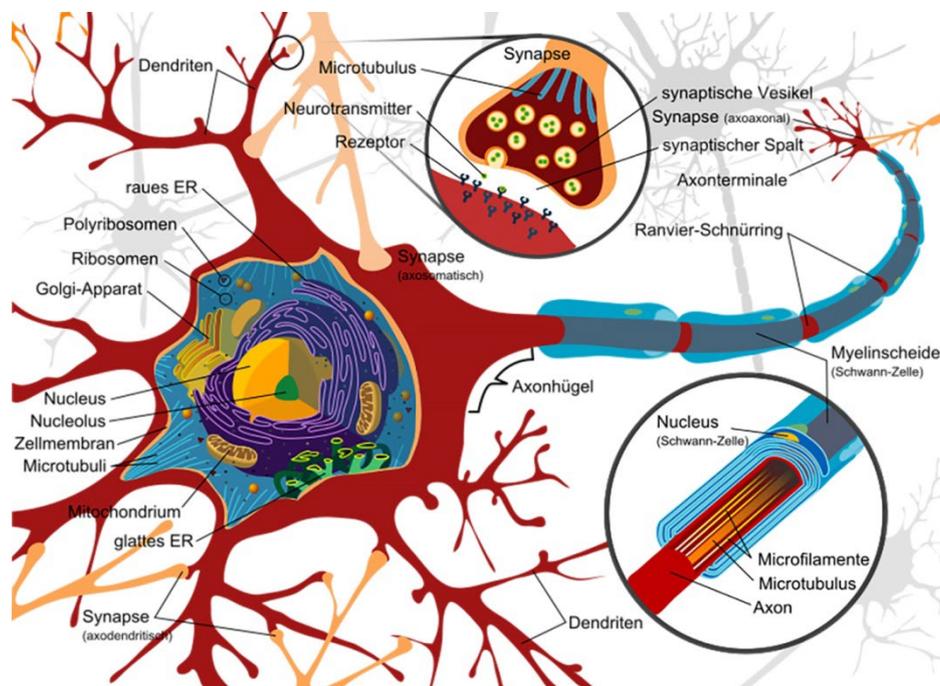
## 6.2 Bestandteile eines Nervensystems

Ein Nervensystem besteht (wie oben bereits ausgeführt) aus Neuronen und Gliazellen. Im Nervensystem von Wirbeltieren gibt es zehnmal bis fünfzigmal mehr Gliazellen im Vergleich zur Neuronenanzahl.

### (A) Neuronen

Neuronen sind im Nervensystem so angeordnet, dass Informationen aus den Sinnesrezeptoren (sensorische Neuronen, Synonym: afferente Neuronen) zur Verarbeitung zu den Ganglien und Informationen aus den Ganglien zum Erfolgsorgan (motorische Neuronen, Synonym: efferente Neuronen) transportiert werden können. Die Ansammlung von Zellkörpern der Neuronen wird als **Ganglion** (Plural: **Ganglien**) bezeichnet. In den Ganglien findet die Verarbeitung der Informationen statt.

Um ihre Aufgaben zu erfüllen, sind Neuronen entsprechend aufgebaut (siehe Abb. 6.2). Neuronen haben grob betrachtet Dendriten, ein Axon und einen Zellkörper. Über die Dendriten nehmen die Neuronen Informationen auf. An den Dendriten werden jedoch noch keine Aktionspotenziale generiert, dies erfolgt erst am Übergang vom Axonhügel zum Axon. Am Axonabschnitt nach dem Axonhügel wird beim Erreichen eines Schwellenwerts ein Aktionspotenzial aufgebaut (siehe Abschnitt 6.4), welches dem Axon entlang zu den Endköpfchen wandert. Das Axon sorgt dementsprechend für den gerichteten Informationsfluss. In den Endköpfchen führt das Aktionspotenzial zur Ausschüttung von Neurotransmittern, die benachbarte Zellen (Neuronen oder Muskelzellen) erregen. Neuronen besitzen zudem einen Zellkörper (Neurosoma). Im Zellkörper befinden sich der Zellkern und die Zellorga-



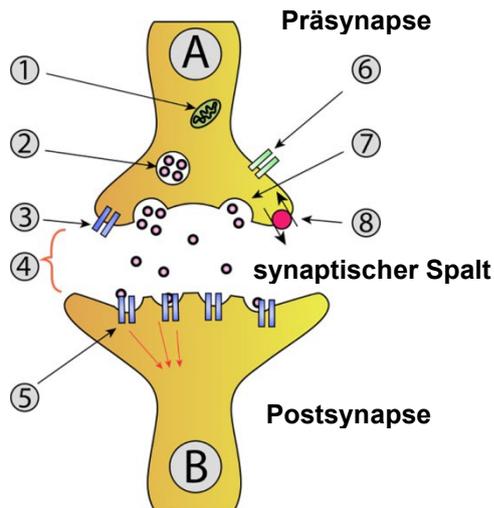
**Abb. 6.2:** Neuronen-Anatomie am Beispiel einer multipolaren Nervenzelle eines Wirbeltiers (Axone mit Myelinscheiden)

Bild: LadyofHats (Original), NEUROtiker (Deutsche Übersetzung), 2007

nellen wie beispielsweise der Golgi-Apparat, die sich aber auch teilweise in den Fortsätzen (Neuriten: Dendriten, Axon) finden. Im Golgi-Apparat werden die Neurotransmitter aufgebaut und von dort über ein schienenartiges System (Mikrotubuli) zu den Endköpfchen befördert.

### (B) Synapsen

Die Neuronen sind über Synapsen untereinander verschaltet. Auch die Verbindung von motorischen Neuronen und Muskelzellen erfolgt über Synapsen, die als motorische Endplatten bezeichnet werden. Es gibt bei den Tieren zwei unterschiedliche Arten von Synapsen: chemische Synapsen und elektrische Synapsen.



**Abb. 6.3: Chemische Synapse**

Erregungsübertragung von einer Nervenzelle A zu einer Zelle B (synaptische Transmission)

- (1) Mitochondrium
- (2) synaptisches Vesikel
- (3) präsynaptischer Autorezeptor
- (4) synaptischer Spalt mit Neurotransmitter
- (5) postsynaptischer Rezeptor
- (6) Calciumkanal
- (7) Freisetzung durch Exocytose
- (8) Aktiver Transport, eventuell mit Wiederaufnahme von Neurotransmitter

Bild: fr:Utilisateur:Dake, 2010

**Chemische Synapsen** bestehen aus einer Präsynapse, Postsynapse, einem synaptischen Spalt und sind von Gliazellen (Astrocyten) umhüllt.

Bei den **elektrischen Synapsen** sind die Neuronen über Gap junctions miteinander verbunden. Die Impulse werden direkt – ohne Neurotransmitter – auf die Folgezelle übertragen.

### (C) Gliazellen

Glia ist griechisch und bedeutet Leim und steht für eine Aufgabe der Gliazellen, das Umhüllen und Verbinden von Neuronen. Die Aufgabenbereiche der Gliazellen sind jedoch weitaus umfangreicher. Die Gliazellen können in drei Untergruppen untergliedert werden, in die Astrocyten, Oligodendrocyten und Mikrogliazellen. Diese Zelldifferenzierung der Gliazellen findet sich aber nicht bei allen tierischen Organismen.

Gliazellen, die zur Untergruppe der **Astrocyten** gehören, sind miteinander verbunden und bilden ein Netzwerk, das die Neuronen stützt und schützt. Ein Teil dieses Netzwerks ist bei Wirbeltieren die Blut-Hirn-Schranke, die verhindert, dass wasserlösliche Giftstoffe aus dem Blut ins Gehirn gelangen. Andere Astrocyten sind Bestandteile von chemischen Synapsen (Synapsen, die mit Neurotransmittern arbeiten), sie umschließen die Synapse und nehmen überschüssige Transmitter auf und bauen diese ab bzw. setzen Neurotransmitter frei. Zudem regulieren sie die Ionenkonzentration ( $H^+$ ,  $K^+$ , und  $Ca^{2+}$ ) in den Synapsen und transportieren Ionen in die Synapsen. Astrocyten sind durch die Freisetzung von Neurotransmittern an der Informationsverarbeitung im Gehirn beteiligt. Astrocyten sind wie Neuronen in der Lage, Signale zu übertragen, jedoch ist die Übertragung sehr langsam. Astrocyten sind an der Synapsen-Bildung und am Synapsen-Abbau beteiligt. Sie haben eine morphologische Plastizität (Möglichkeit der Ausbreitung und Rückziehung) und können dadurch beim Aufbau und beim Abbau (Phagocytieren von präsynaptischen Endigungen) behilflich sein.

Zellen der Untergruppe **Oligodendrocyten** bilden die lipidreichen Myelinscheiden wie die Schwann-Zellen, die um die Axone der Wirbeltierneuronen gelegen sind. Die Isolierung, die durch die Schwann-Zellen entsteht, führt zu einer schnellen Erregungsleitung von ca. 120 m/s (ohne Schwann-Zellen 25 m/s). Oligodendrocyten isolieren auch Nervenstränge.

**Mikrogliazellen** sind bewegliche Zellen. Sie zersetzen abgestorbene Neuronen und sind für die Immunfunktion im Gehirn zuständig. Mikrogliazellen sind mit Makrophagen vergleichbar.

Die unterschiedlichen Gliazellen sind zudem für die Verbesserung der Ernährung der Neuronen zuständig. Gliazellen nehmen die Nährstoffe aus dem Blut auf und geben sie an die Neuronen ab. Als Lieferant von Lactat können Gliazellen (Astrocyten) bei der Energieversorgung der Neuronen mitwirken. Des Weiteren versorgen sie Neuronen mit Cholesterin.

### **(D) Neurotransmitter**

Neurotransmitter (Synonym: Transmitter) sind die Botenstoffe an den chemischen Synapsen. Sie werden im Zellkörper oder in den Endköpfchen der Nervenzelle produziert und liegen danach in den Endköpfchen in Vesikeln vor. In jedem Vesikel befindet sich die gleiche Anzahl an Neurotransmittern. Im Nervensystem werden unterschiedliche Neurotransmitter eingesetzt. Es gibt Neurotransmitter, die nachfolgende Zellen aktivieren, und welche, die die Folgezelle hemmen.

Beispiele von Neurotransmittern:

Acetylcholin (ACh): Neurotransmitter an der muskulären Endplatte. Neurotransmitter im Gehirn und Rückenmark.

Dopamin (DA): Dopamin spielt beim Belohnungsmechanismus eine Rolle.

Glutamat (Glu): Schneller erregender Neurotransmitter des Gehirns. Neurotransmitter der Sehsinneszellen.

## 6.3 Nervensysteme

Je nach Taxon finden sich verschiedene neuronale Systeme. Man kann zwischen keinem System, Nervennetz, Ringnervensystem, Vierstrang-Nervensystem, Strickleiternnervensystem und Zentralnervensystem unterscheiden.

### **(A) Kein System**

Einzeller (Bakterien, Archaeen und Protozoen) und Schwämme (*Porifera*) besitzen kein Nervensystem. Schwämme haben drei unterschiedliche Zelltypen, einer dieser Zelltypen – die Amöbocyten – können sich mithilfe von Pseudopodien (Ausstülpungen der Plasmamembran) fortbewegen. Sie nehmen unter anderem Botenstoffe auf und geben sie an andere Zellen ab. Amöbocyten übertragen somit Informationen, wie dies Neuronen (bedeutend schneller) in einem Nervensystem tun.

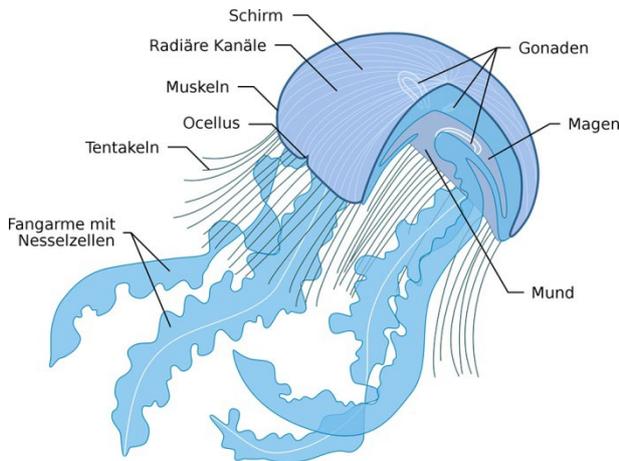
### **(B) Nervennetz**

Die Süßwasserpolyphen (*Hydrozoa*) und die Seeanemonen und Korallen (*Anthozoa*), die zu den Nesseltieren (*Cnidaria*) gehören, haben eine netzartige Anordnung ihrer Nervenzellen, die sich über den gesamten Körper verteilt. Sie besitzen keine Zentraleinheit (kein „Gehirn“) in ihrem Nervensystem. Es gibt lediglich eine ringförmige vermehrte Ansammlung von Neuronen um die Mundöffnung. Bei diesem neuronalen System kommen hauptsächlich elektrische Synapsen vor.

### **(C) Ringnervensystem**

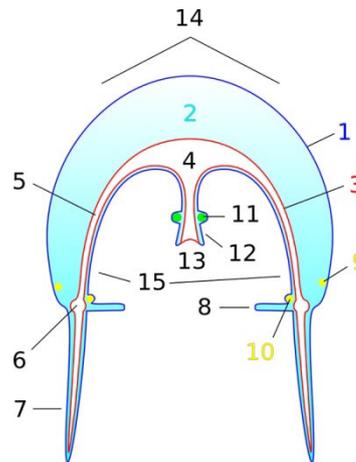
Schirmquallen (*Scyphozoa*), die auch zu den Nesseltieren gehören, besitzen zwei ringförmige Ansammlungen von Nervenzellen: einen inneren Ring, der die Schirmbewegung koordiniert (z. B. Zusammenziehen des Schirms zum Erzeugen eines Rückstoßes), und einen äußeren Ring, der mit den

Rhopalien (Sinnesorganen) in Verbindung steht. Beide Ringe sind über Neuronen miteinander verbunden.



**Abb. 6.4: Bau Schirmqualle**

Bild: Whidou, 2015



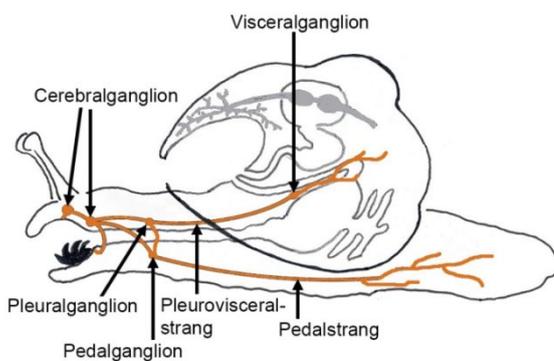
**Abb. 6.5: Querschnitt Schirmqualle**

(1) Ektoderm (Epidermis); (2) Mesogloea; (3) Endoderm (Gastrodermis); (4) Magen; (5) Radiärer Kanal; (6) Zirkulärer Kanal; (7) Tentakel; (8) Velum; (9) Äußerer Nervenring; (10) Innerer Nervenring; (11) Gonaden; (12) Magenstiel; (13) Mund; (14) Aborale Oberfläche; (15) Orale Oberfläche.

Bild: Vázquez, 2007

**(D) Vierstrang-Nervensystem**

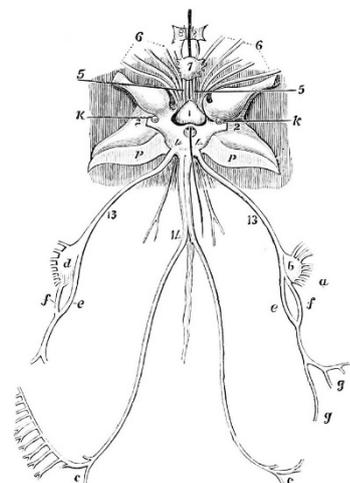
Bei den Weichtieren (*Mollusca*) findet man bei den meisten Taxa kein lokales Gehirn. Es gibt mehrere Ganglien, die in der Nähe der Erfolgsorgane lokalisiert sind (z. B. bei den Schnecken *Gastropoda*: das Pedalganglion für die Steuerung der Fußmuskulatur, das Visceralganglion für die Steuerung des Hinterdarms, der Niere und der Reproduktionsorgane). Die Ganglien sind in ein Vierstrang-Nervensystem eingebunden, das aus einem zentralen Schlundring (Cerebralganglien) besteht, von dem aus kaudal (schwanzwärts) vier Nervenstränge in den Körper abgehen. Die Cerebralganglien sind die übergeordneten Ganglien. Bei den Tintenfischen (Taxon der Kopffüßer *Cephalopoda*), die auch zu den Weichtieren gehören, ist ein Gehirn ausgebildet.



**Abb. 6.6: Vierstrang-Nervensystem Schnecke**

Auf dem Bild wird nur eine Körperhälfte dargestellt

Bild: Baur, 2018

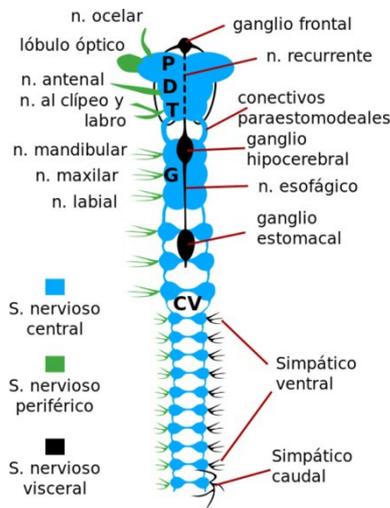


**Abb. 6.7: Vierstrang-Nervensystem Tintenfisch**

Bild: unbekannt, 1876

**(E) Strickleiternnervensystem**

Die Ringelwürmer (*Annelida*) und Gliederfüßer (*Arthropoda*) haben ein bauchseitiges Strickleiternnervensystem. Es gibt ein Gehirnganglion (bzw. Gehirnganglien), von dem aus zwei Nervenstränge nach hinten führen. Die beiden Nervenstränge sind über Ganglien (Kommissuren), pro Körpersegment ein Paar, verbunden.



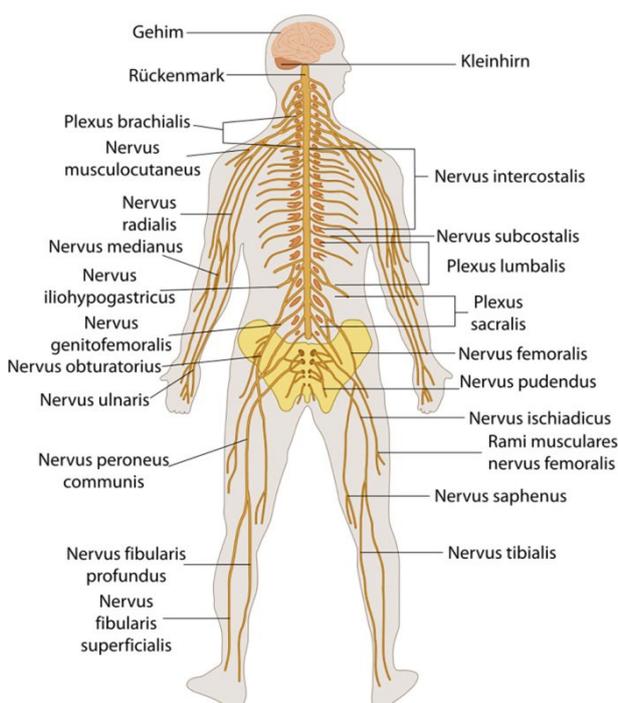
**Abb. 6.8: Strickleiternnervensystem**

Beispiel Insekt

Bild: Dessì, 2008

**(F) Zentralnervensystem (Gehirn und Rückenmark)**

Im Gegensatz zu den Ringelwürmern und Gliederfüßern haben die Wirbeltiere (*Vertebrata*) ein Rückenmark, das mit dem Gehirn in Verbindung steht. Das Gehirn, das sich in Teilbereiche aufteilt, ist die zentrale Steuereinheit. Die Impulse gelangen über die sensorischen Neuronen des Peripheren Nervensystems durch das Rückenmark zum Gehirn oder z. T. direkt ins Gehirn. Nach der Verarbeitung im Gehirn (bzw. Generierung von Reflexen im Rückenmark) werden Impulse über das Rückenmark zu den motorischen Neuronen des Peripheren Nervensystems geleitet und eine Reaktion auf den Umweltreiz erfolgt.



**Abb. 6.9: Zentralnervensystem**

Im Bild zusammen mit Teilen des Peripheren Nervensystems dargestellt.

Bild: TheEmirr, 2010

## 6.4 Aktionspotenzial

Um das Aktionspotenzial zu verstehen, muss man zuerst das Membranpotenzial betrachten.

### **(A) Membranpotenzial**

An der Plasmamembran jeder Zelle existiert ein Membranpotenzial. Der Unterschied der Nicht-Nervenzellen ist, dass sie, ausgenommen von Muskelzellen, nicht die Fähigkeit besitzen, ein Aktionspotenzial aufzubauen. Das Aktionspotenzial wird von Neuronen genutzt, um gerichtet Informationen zu übermitteln.

Das Membranpotenzial (Synonym bei Nervenzelle: Ruhepotenzial) einer Zelle entsteht aus dem Grund, dass in die Plasmamembran mehr Kalium-Kanäle ( $K^+$ -Kanäle) als Natrium-Kanäle ( $Na^+$ -Kanäle) eingebaut sind. Im Zellinneren befinden sich negativ geladene Moleküle ( $A^-$ ), dies sind Proteine und Aminosäuren, die die Plasmamembran nicht passieren können. Da wenig  $Na^+$ -Kanäle vorhanden sind, strömt im Vergleich zu  $K^+$  nur wenig  $Na^+$  durch Diffusion in die Zelle. Das eingeströmte  $Na^+$  wird durch die Natrium-Kalium-Pumpe (Synonym: Natrium-Kalium-ATPase) nach außen abgegeben und hierfür  $K^+$  nach innen transportiert. Durch die Natrium-Kalium-Pumpe werden drei Moleküle  $Na^+$  durch zwei Moleküle  $K^+$  ausgetauscht.  $K^+$  strömt durch Diffusion in die Zelle und aus der Zelle. Die  $A^-$ -Ionen halten aber über elektrostatische Kräfte viele  $K^+$ -Ionen zurück. Hierdurch kommt es zu einem Unterschied in der Verteilung der Ionen und einem Ladungsunterschied zwischen dem Außen- und Innenbereich. Innen ist die Ladung negativ und außen positiv. Das Membranpotenzial beträgt  $-70$  mV (dies kann bei den unterschiedlichen Zellen etwas abweichen).

### **(B) Aktionspotenzial**

Neuronen unterscheiden sich von anderen Zellen dadurch, dass sie in der Plasmamembran zu den normalen Kanälen zusätzlich noch spannungsgesteuerte  $K^+$ - und  $Na^+$ -Kanäle haben.

Ein Aktionspotenzial entsteht, wenn am Axonabschnitt hinter dem Axonhügel ein Schwellenwert ( $-50$  mV bis  $-55$  mV) überschritten wird. Dies erfolgt, wenn durch eine Aktivierung der Nervenzelle über Neurotransmitter an den Dendriten  $Na^+$  einströmt und dieser Einstrom so groß ist, dass sich die Ladung in den Bereich des Schwellenwertes verschiebt. Wird der Schwellenwert nicht erreicht, entsteht kein Aktionspotenzial. Beim Erreichen des Schwellenwertes öffnen sich die spannungsgesteuerten  $Na^+$ -Kanäle und  $Na^+$  strömt ein (siehe Abb. 6.10 [2]).

Das Einströmen von  $Na^+$  in die Zelle führt zur Depolarisation (Potenzial an der Membran:  $+50$  mV; siehe Abb. 6.11). Das sich anreichernde  $Na^+$  strömt durch Diffusion und elektrostatische Kräfte zu dem nächsten Axonabschnitt. Bei marklosen Neuronen (Neuronen ohne Schwann-Zellen) ist dies der nebenliegende Abschnitt und bei markhaltigen Neuronen ist dies der nächste Ranvier-Schnürring. Hier werden nun ebenfalls eine Depolarisation und alle weiteren Schritte ausgelöst.

Für die Erklärung verbleiben wir aber am ersten Abschnitt, der depolarisiert wurde. Hier schließen sich die spannungsgesteuerten  $Na^+$ -Kanäle in der Plasmamembran wieder (da die Spannung außerhalb des Öffnungsbereiches liegt). Die spannungsgesteuerten  $K^+$ -Kanäle öffnen sich (siehe Abb. 6.10 [4]).  $K^+$  strömt aus der Zelle, hierdurch stellt sich die ursprüngliche Ladungsverteilung (nicht die Verteilung der Ionen) wieder ein.

Die Natrium-Kalium-Pumpe befördert  $Na^+$  nach außen und  $K^+$  nach innen. Da die spannungsgesteuerte  $K^+$ -Kanäle träge reagieren (der Spannungsbereich ihrer Schließung ist erreicht) und noch geöffnet sind, strömt aber viel  $K^+$  wieder durch Diffusion aus der Zelle. Dies führt zu einer Hyperpolarisation mit der Ladung  $-75$  mV. Am Axonabschnitt, der hyperpolarisiert ist, kann kein neues Aktionspotenzial entstehen.

Nun schließen sich die spannungsgesteuerten K<sup>+</sup>-Kanäle und das Ruhepotential wird wieder hergestellt.

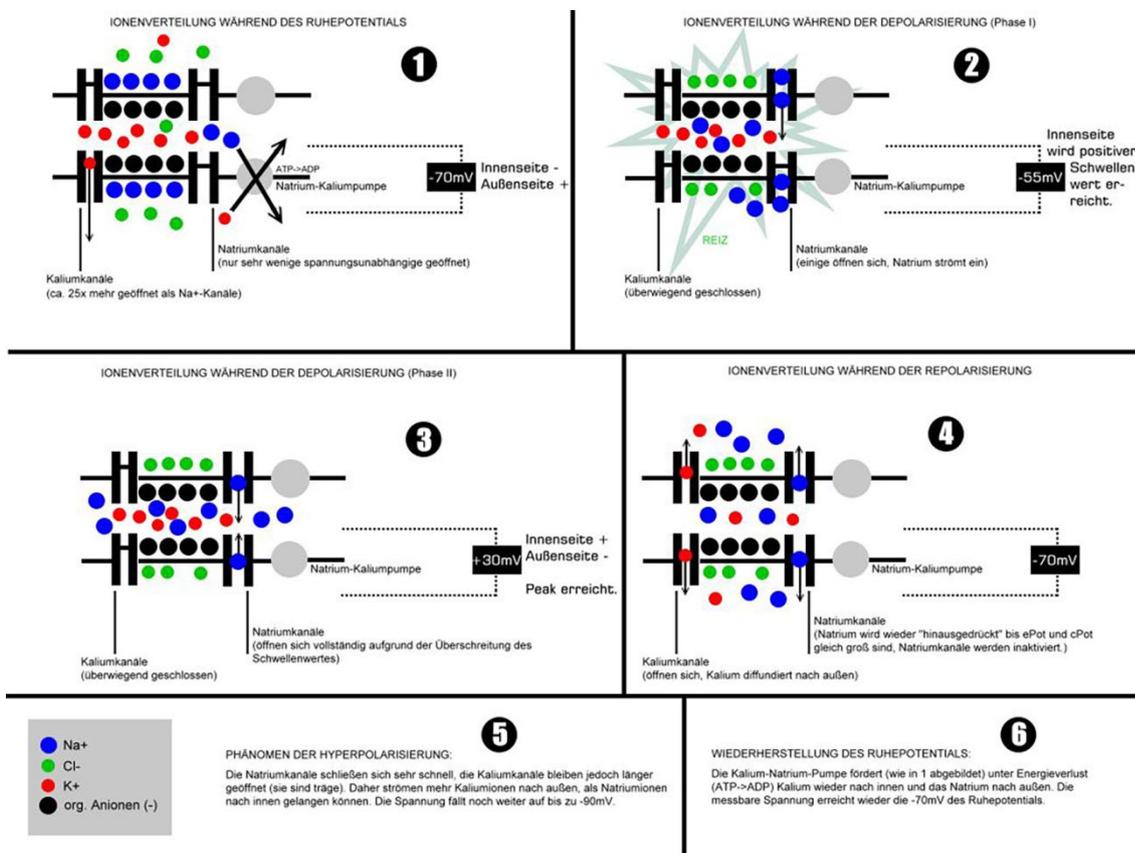


Abb. 6.10: Aktionspotential

(1) Ruhepotential; (2) die Phasen der langsamen Vordepolarisierung oder Initiation; (3) die Depolarisierung und Overshoot; (4) die Repolarisierungsphase; (5) die Hyperpolarisierung; (6) die Zeit bis zur Wiederherstellung der Ausgangslage im Verlauf einer Aktionspotentialserie

Bild: Weiss, 2008

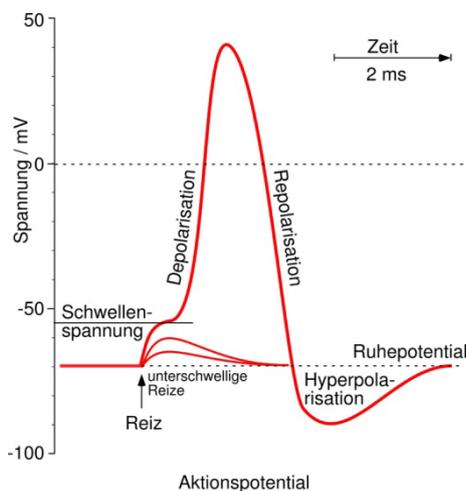


Abb. 6.11: Ladungsänderung beim Aktionspotential

Bild: Chris 73, 2010

**(C) Informationstransport an der Nervenzelle im Gesamtblick****(1) Aktivierung und Depolarisation der Nervenzelle**

Durch die Verbindung der Neurotransmitter mit den Rezeptoren der Dendriten werden Na<sup>+</sup>-Kanäle an den Dendriten geöffnet und Na<sup>+</sup> strömt in die Zelle ein und strömt zum Axon.

**(2) Weiterleitung des Aktionspotenzials entlang des Axons**

Über das Aktionspotenzial verläuft die Information zu den Endköpfchen.

**(3) Impulsübertragung an der Synapse**

Trifft das Aktionspotenzial an den Endköpfchen ein, werden in der Plasmamembran der Endköpfchen spannungsgesteuerte Calcium-Kanäle (Ca<sup>2+</sup>-Kanäle) geöffnet. Dies führt dazu, dass Membranbläschen mit Neurotransmittern zur Plasmamembran transportiert werden und die Neurotransmitter über Exocytose in den synaptischen Spalt abgegeben werden. Die in den synaptischen Spalt abgegebenen Neurotransmitter verbinden sich mit den Rezeptoren an der Folgezelle. Die Rezeptoren verändern ihre Form und öffnen hierdurch Kanäle für Ionen (z. B. Na<sup>+</sup>). Spezielle Enzyme bauen die Transmitter wieder ab, woraufhin sich die Kanäle wieder verschließen.

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

Aktionspotenzial	Gap junction	Neurotransmitter
Axon	Kanal	Ranvier-Schnürring
chemische Synapse	Membranpotenzial	Schwann-Zelle
Dendrit	motorische Endplatte	spannungsgesteuerter Kanal
elektrische Synapse	Natrium-Kalium-Pumpe	Synapse
Ganglion	Nervensystem	

**Aufgabe 2:**

- (1) Was sind die Aufgaben eines Nervensystems?
- (2) Stellen Sie Neuronen und Gliazellen einander gegenüber.
- (3) Welche unterschiedlichen Typen von Neuronen gibt es? [●]
- (4) Wo findet man die einzelnen Neuronentypen im Körper? (geeignet am Beispiel Mensch erarbeiten) [●]
- (5) Wie ist ein Neuron aufgebaut?
- (6) Stellen Sie die unterschiedlichen Nervensysteme einander gegenüber.
- (7) Welche Komponenten gibt es innerhalb eines Nervensystems?
- (8) Wodurch und wie wird ein Aktionspotenzial ausgelöst?
- (9) Erklären Sie die einzelnen Vorgänge des Aktionspotenzials.
- (10) Erklären Sie die Signalübertragung im synaptischen Spalt.

----

## 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.
- Galizia, C. G. & Lledo, P.-M. (2013). *Neurosciences – From Molecule to Behavior: a university textbook*. Heidelberg: Springer.
- Heldmaier, G., Neuweiler, G. & Rössler, W. (2013). *Vergleichende Tierphysiologie* (2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (8. Auflage). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Sadava, D. E., Hillis, D. M., Heller, H. C. & Berenbaum, M. (2011). *Biologie* (9. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

## Abbildungen

- Abbildung 6.1: **Neuronen Großhirnrinde Maus**. Ursprünglicher Bildtitel: Mikroskopische Aufnahme der Großhirnrinde einer Maus; Bild von: Wei-Chung Allen Lee, Hayden Huang, Guoping Feng, Joshua R. Sanes, Emery N. Brown, Peter T. So, Elly Nedivi; 2005; Lizenz: CC BY 2.5; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PLoSBIol4.e126.Fig6fNeuron.jpg>
- Abbildung 6.2: **Neuron-Anatomie am Beispiel einer multipolaren Nervenzelle eines Wirbeltiers (Axone mit Myelinscheiden)**. Ursprünglicher Bildtitel: Aufbau eines Neurons; Bild von: LadyofHats (Original); NEUROtiker (Deutsche Übersetzung); 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d6/Complete\\_neuron\\_cell\\_diagram\\_de.svg/819px-Complete\\_neuron\\_cell\\_diagram\\_de.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d6/Complete_neuron_cell_diagram_de.svg/819px-Complete_neuron_cell_diagram_de.svg.png)
- Abbildung 6.3: **Chemische Synapse**. Ursprünglicher Bildtitel: Reizübertragung einer Synapse (chemisch); Bild von: vectorization: Mouagip, Synapse\_diag1.png drawn by fr:Utilisateur:Dake, corrections of original PNG by en>User:Nrets; 2010; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Synaptisches\\_Vesikel#/media/Datei:Synapse\\_diag1.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Synaptisches_Vesikel#/media/Datei:Synapse_diag1.svg)
- Abbildung 6.4: **Bau Schirmqualle**. Ursprünglicher Bildtitel: Anatomy of jellyfish; Bild von: Whidou; 2015 Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schirmquallen#/media/Datei:Anatomy\\_of\\_a\\_jellyfish.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Schirmquallen#/media/Datei:Anatomy_of_a_jellyfish.svg)
- Abbildung 6.5: **Querschnitt Schirmqualle**. Ursprünglicher Bildtitel: Morphologie einer Qualle; Bild von: Xavier Vázquez; 2007 Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Qualle#/media/Datei:Hydromedusa.svg>
- Abbildung 6.6: **Vierstrang-Nervensystem Schnecke**. Bild von: Armin Baur; 2018
- Abbildung 6.7: **Vierstrang-Nervensystem Tintenfisch**. Ursprünglicher Bildtitel: Nervensystem des Tintenfisches; Bild von: unbekannt; 1876; Lizenz: Public domain (Bild aus: Charlton Bastian – Nature of the Invertebrate Brain. The Popular Science Monthly 10:27–38 (fig. 13, p. 35)); verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:PSM\\_V10\\_D045\\_Nervous\\_system\\_of\\_the\\_cuttle\\_fish.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:PSM_V10_D045_Nervous_system_of_the_cuttle_fish.jpg)
- Abbildung 6.8: **Strickleiternnervensystem**. Ursprünglicher Bildtitel: Strickleiternnervensystem der Insekten; Bild von: Giancarlo Dessi; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:Insects\\_nervous\\_system-es.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:Insects_nervous_system-es.svg)
- Abbildung 6.9: **Zentralnervensystem**. Ursprünglicher Bildtitel: Übersicht über das menschliche Nervensystem; Bild von: TheEmirr; 2010; Lizenz: CC BY 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:TE-Nervous\\_system\\_diagram-de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Nervensystem#/media/Datei:TE-Nervous_system_diagram-de.svg)
- Abbildung 6.10: **Aktionspotenzial**. Ursprünglicher Bildtitel: Aktionspotenzial innerhalb eines Neurons; Bild von: Dimitrios Pascal Weiss; 2008; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Aktionspotential#/media/Datei:Aktionspotential.jpg>
- Abbildung 6.11: **Ladungsänderung beim Aktionspotenzial**. Ursprünglicher Bildtitel: Verlauf des Aktionspotenzials; Bild von: Chris 73; 2010; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Aktionspotential#/media/Datei:Aktionspotential.svg>

## 7. Sinne, Sinnesrezeptoren und Sinnesorgane

Über verschiedenste Sinnesorgane ist es tierischen Organismen möglich, ihre Umwelt wahrzunehmen. Sinnesorgane sind aus verschiedenen Zellen aufgebaut. Wesentliche Zellen eines Sinnesorgans sind Sinnesrezeptoren. Die wichtigsten Sinne sind der Tast-, Seh-, Hör-, Riech-, Schmeck- und Lagesinn. Manche Tiere können aber auch Wärmestrahlung, elektrische Felder, Magnetfelder oder die Polarisation des Lichts wahrnehmen. Alle diese Sinne werden über Sinnesorgane detektiert und im Gehirn zu einer Wahrnehmung. Teilweise werden tierische Organismen unterschätzt, so können beispielsweise Quallen (Schirmquallen *Scyphozoa*) über ein Sinnesorgan (das Rhopalium – siehe Abb. 7.17 und 7.18) Licht, chemische Stoffe und ihre Lage im Wasser detektieren. Egal, um welches Sinnesorgan es sich handelt, die beinhalteten Sinnesrezeptoren können einem von drei zu unterscheidenden Typen zugeordnet werden.



**Abb. 7.1: Antennen und Komplexaugen Wespe**  
Deutsche Wespe (*Vespula germanica*)

Bild: skeeze, 2009

### - Inhaltliche Lernziele -

- Sie können:
- die unterschiedlichen Reize, die von Tieren wahrgenommen werden, nennen;
  - die Typen von Sinnesrezeptoren benennen;
  - die Anatomie der Sinnesrezeptortypen beschreiben;
  - die Funktionsweise (Physiologie) der unterschiedlichen Sinnesrezeptoren erläutern;
  - den Aufbau exemplarischer Sinnesorgane beschreiben;
  - die Funktionsweise exemplarischer Sinnesorgane erläutern.

### 7.1 Umweltreize, die Tiere wahrnehmen können

Tiere können, wie in der Einleitung angemerkt, unterschiedliche Reize aus der Umwelt aufnehmen, verarbeiten und auswerten.

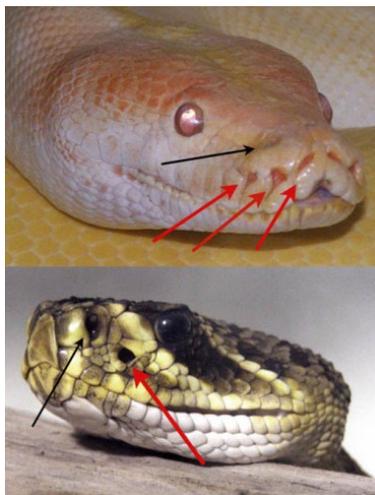
#### (A) Licht

Viele Tiere können Licht wahrnehmen (Sehsinn). Je nach Tierart kann das menschlich sichtbare Lichtspektrum, aber auch UV-Licht, Infrarotstrahlung oder die Polarisation des Lichts über Sinnesrezeptoren erfasst werden. Das Licht breitet sich durch elektromagnetische Lichtwellen im Raum aus. Die Schwingungsrichtung der Wellen ist hierbei unterschiedlich. Schwingen die Lichtstrahlen nur in einer Ebene, spricht man von linear polarisiertem Licht. Eine Polarisation kann durch Polarisationsfilter, Brechungen des Lichts oder Reflexionen entstehen. Das Sonnenlicht wird beim Durchdringen der Atmosphäre teilweise linear polarisiert. Diese lineare Polarisation kann von einigen Insekten wahrgenommen werden und wird zur Orientierung eingesetzt (z. B. Honigbiene *Apis mellifera*). Infrarotstrahlung ist Wärmestrahlung und wird von warmen Objekten abgestrahlt. Einige Schlangen als Bei-

spiel können mithilfe ihres Grubenorgans Infrarotstrahlung wahrnehmen. Das Grubenorgan liegt links und rechts am Oberkiefer (siehe Abb. 7.2). In den Vertiefungen des Grubenorgans befindet sich eine Membran, in der Infrarotrezeptoren eingebaut sind.

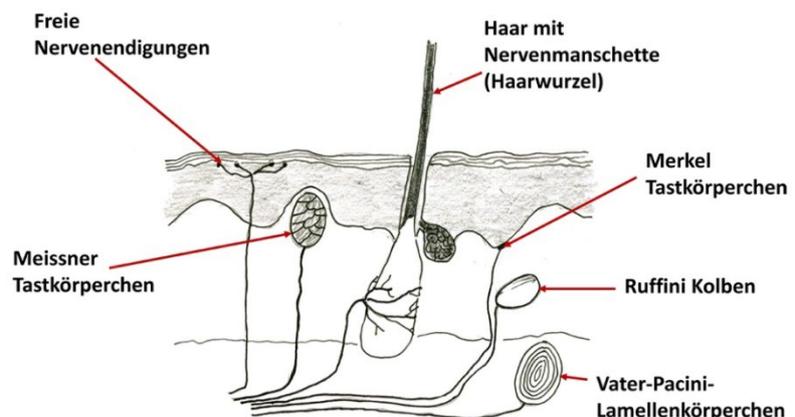
### (B) Temperatur

Viele Organismen können Wärme oder Kälte direkt durch einen Kontakt mit warmen oder kalten Oberflächen bzw. kalter oder warmer Umgebungsluft detektieren (Temperatursinn). Sie verwenden hierfür keine Organe zur Detektion von Infrarotstrahlung, sondern spezielle Temperatursensoren. Die Thermorezeption findet beispielsweise bei Wirbeltieren durch Rezeptoren (freie Nervenzellendigungen; siehe Abb. 7.3), die in der Haut sitzen, statt. Diese Nervenzellen verändern die Frequenz ihrer Aktionspotenziale in Abhängigkeit zur Temperatur. Man kann bei den Temperatursensoren Wärme- und Kälterezeptoren unterscheiden.



**Abb. 7.2: Grubenorgan Schlange**  
Python (oben) und Klapperschlange (unten). Rote Pfeile: Öffnungen des Grubenorgans und der Labialgruben; Schwarze Pfeile: Nasenloch

Bild: unbekannt, 2006



**Abb. 7.3: Rezeptoren der Säugetierhaut**

Bild: Baur, 2015

### (C) Schall

Viele Tiere können Töne, ausgelöst durch Schallwellen, die sich über die Luft oder das Wasser ausbreiten, detektieren (Hörsinn) bzw. nutzen Schallwellen zur Kommunikation. Für den Zweck der Kommunikation werden in Schwingung gebrachte Stimmbänder, aneinander reibende Körperteile oder andere Vorrichtungen eingesetzt, um Schallwellen zu erzeugen. Hierbei erzeugen Tiere nicht nur aktiv Schallwellen, um zu kommunizieren, sondern nutzen sie z. T. auch zur Beutelokalisation (Echoortung). Schallwellen werden nicht nur über die Luft und das Wasser transportiert, sie werden auch über das Substrat weitergeleitet (Substratschall) und können von einigen Tieren am Substrat abgehört werden (z. B. Elefanten nehmen Substratschall über die Füße auf, Schlangen nehmen Substratschall über auf den Boden gelegte Unterkiefer auf). Schall kann nach seiner Frequenz in Infraschall, menschlich hörbaren Schall, Ultraschall und Hyperschall unterteilt werden. Die Tiere unterscheiden sich in ihrer Fähigkeit, welche Frequenzen sie wahrnehmen können. Elefanten, Giraffen und Wale können Infraschall aussenden und detektieren. Ultraschall wird von Fledermäusen zur Lokalisation ihrer Beute verwendet.

### Echoortung unter Wasser

Zahnwale (*Odontoceti*) nutzen ähnlich wie Fledermäuse (*Microchiroptera*) Schallwellen zur Lokalisation (Echoortung) von Beutetieren. Der Unterschied im Vergleich zu den Fledermäusen kann an drei Punkten beschrieben werden:

- Das Medium, über welches sich die Schallwellen ausbreiten, ist Wasser, bei Fledermäusen die Luft.
- Die Frequenz der Zahnwale liegt im Bereich des Infraschalls und des hörbaren Bereichs, bei Fledermäusen im Ultraschallbereich.
- Die Aussendung der Echolaute erfolgt bei den Zahnwalen mithilfe der Melone (siehe Abb. 7.4). Die Melone liegt über dem Oberkiefer und verursacht die bei vielen Arten abgerundete Stirn. Das schwammige Bindegewebe ist sehr fettreich. Die Lautbildung ist noch nicht vollständig geklärt, eine anerkannte Theorie besagt, dass die Stimmlippen mithilfe von fettgefüllten Säckchen, den *dorsal bursae*, die Laute erzeugen, die in die Melone geleitet und von dort ausgesandt werden. Die Schallwellen, die bei der Echoortung zurückkehren, werden über den hinteren Teil der Unterkiefer auf das Mittel- und Innenohr übertragen. Bei den Fledermäusen werden die Laute durch die Stimmbänder im Kehlkopf gebildet, über Mund oder Nase abgegeben und die zurückkehrenden Schallwellen werden über die Ohren aufgenommen.

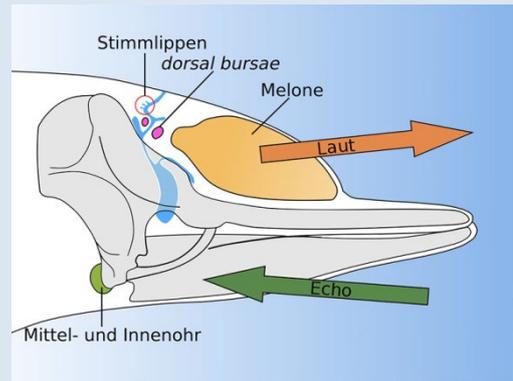


Abb. 7.4: Schnitt durch den Kopf eines Zahnwals

Bild: Martin-rnr, 2011

### (D) Elektrische Felder

Einige Tiere, wie beispielsweise Knorpelfische (*Chondrichthyes*), Knochenfische (*Osteichthyes*), Hummeln (*Bombus*) oder Honigbienen (*Apis mellifera*), verfügen über die Fähigkeiten der elektrischen Orientierung (elektrischer Sinn). Bei der elektrischen Orientierung können elektrische Felder über Rezeptoren wahrgenommen werden. Hummeln und Bienen werden durch ein von Pflanzen erzeugtes elektrisches Feld angezogen. Das elektrische Feld der Pflanzen kann sich durch zuvor gelandete Insekten verändern (positive Ladung) und so nachkommenden Insekten Auskunft über vorherige Besucher und den zu erwartenden Pollen- oder Nektarvorrat geben. Insekten, die in einer gewissen Höhe fliegen, verlieren Elektronen und sind dadurch elektrisch positiv geladen. Landen positiv geladene Insekten auf einer Pflanze, nehmen sie Elektronen von der Pflanze auf. Haie, als weiteres Beispiel, finden im Sand oder in der Vegetation versteckte Beute über ihr Ampullensystem, mit dem sie elektrische Felder erkennen. Alle Organismen erzeugen über Zellaktivitäten schwache elektrische Felder und können dadurch über Rezeptoren, die elektrische Felder erkennen, aufgespürt werden.

### (E) Erdmagnetfeld

Einige Tiere orientieren sich am Erdmagnetfeld (Magnetsinn). Einen Magnetsinn findet man bei einigen Arten der Vögel (*Aves*), Insekten (*Insecta*), Weichtiere (*Mollusca*), Amphibien (*Amphibia*), Reptilien (*Reptilia*), Fische (*Chondrichthyes*, *Osteichthyes*) und Säugetiere (*Mammalia*). Der Magnetsinn hilft bei der Orientierung (z. B. Hilfe bei der Orientierung beim Flug der Zugvögel, Hilfe bei der Orientierung von Kröten, um ihr Laichgewässer wiederzufinden). Der Sitz der Rezeptoren, die das Magnetfeld lokali-

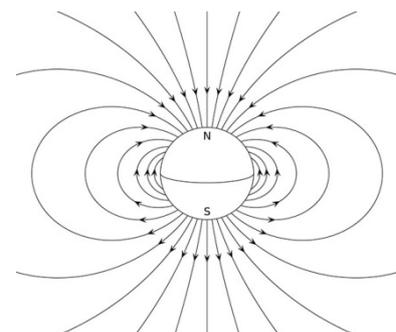


Abb. 7.5: Erdmagnetfeld

Bild: Geek3, 2010

sieren, ist bisher bei den Tieren mit Magnetsinn noch nicht vollständig geklärt.

### **(F) Druck (Druck durch Tasten oder Berührung)**

Nicht nur mehrzellige Organismen, auch einzellige Organismen, können auf Druck reagieren (Drucksinn bzw. Tastsinn). Auf der zellulären Ebene ist es wichtig, auf den osmotischen Druck und einen daraus resultierenden Druck auf die Zellmembran zu reagieren. Ein Druck auf die Zellmembran führt zur Dehnung der Membran und kann dadurch zur Öffnung von dehnungsgesteuerten Kanälen, die in der Membran liegen, führen, was zum Einstrom spezifischer Ionen und u. U. zu einer Veränderung des Membranpotenzials führt. Druck ist ein wichtiger Reiz, beim Tasten oder Berühren ist die Veränderung des Drucks auf die Haut das Signal, welches die Wahrnehmung (z. B. spitzer Gegenstand, elastischer Gegenstand) hervorruft. Zur Detektion von Druck gibt es viele unterschiedliche Druckrezeptoren: Rezeptoren, die nur auf Druckveränderungen reagieren, Rezeptoren, die die Stärke des Druckes registrieren, und Rezeptoren, die auf Vibrationen reagieren.

### **(G) Bewegungen des Wassers**

Tiere, die im Wasser leben, können sich nicht alleine auf ihren Sehsinn verlassen, da in tieferen Wasserschichten die Lichtintensität gering ist. Wasser als flüssiges Medium hat die Eigenschaft, mechanische Signale (Bewegung) über weite Strecken zu transportieren. Jede Bewegung im Wasser erzeugt Wasserströmungen und Druckwellen. Für Knorpelfische, Knochenfische und ständig im Wasser lebende Amphibien ist es daher vorteilhaft, Wasserströmungen wahrnehmen zu können. Dies erfolgt mit dem Seitenlinienorgan (siehe 7.3.2).



**Abb. 7.6:** Seitenlinienorgan Bachforelle  
(*Salmo trutta fario*)

Bild: Apple200, 2014, verändert

### **(H) Chemische Stoffe**

Alle Organismen sind von chemischen Molekülen umgeben, die unterschiedliche Informationen beinhalten. In der Luft können Gerüche von anderen Organismen, von Ereignissen (Brand) oder Pheromone, die zur Kommunikation Verwendung finden, enthalten sein. Werden chemische Stoffe aus der Luft aufgenommen, spricht man von Riechen (Riechsinn). Werden chemische Stoffe im Wasser oder in der Nahrung wahrgenommen, spricht man hingegen vom Geschmack (Geschmacksinn). Der Geschmacksinn und der Riechsinn gehören zu den chemischen Sinnen. Außer den Rezeptoren des Geschmacksinns und Riechsinns gibt es noch Rezeptoren, die im Inneren des Körpers chemische Stoffe detektieren und zur Steuerung der inneren Bedingungen wichtig sind (z. B. Messung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes im Blut, um die Atmung zu steuern).

### **(I) Lage im Raum und Gleichgewicht**

Informationen über die Lage (Lagesinn) im Raum und über das Gleichgewicht (Gleichgewichtssinn) sind für die Fortbewegung von Lebewesen wichtig. Für die Bestimmung der Körperlage wird die Gravitation (Erdbanziehung) als Reiz wahrgenommen. Die Wichtigkeit der Körperlage soll am Beispiel einer Ohrenqualle (*Aurelia aurita*) erläutert werden. Ohrenquallen fressen kleine Zooplankter, diese sind am Tage in den oberen Wasserschichten zu finden. Es ist daher essenziell für die Ohrenqualle, zwischen oben und unten unterscheiden zu können und zudem ihre Schwimmrichtung wahrzunehmen. Die Notwendigkeit des Gleichgewichtssinns soll an einem Zweibeiner dargelegt werden. Könnte

der Körper eines Zweibeiners beim Anheben eines Beines das Gewicht nicht ausbalancieren, würde der Organismus umkippen und eine Fortbewegung wäre unmöglich.

## 7.2 Sinnesrezeptoren

Sinnesrezeptoren (oft synonyme Verwendung finden die Begriffe: Sinneszellen, Rezeptorzellen, Rezeptoren, Sensorzellen, Sensoren) sind Bestandteile von einem Organismus, die zur Detektion von Umweltreizen oder der Situation im Körper (Körpertemperatur, Dehnung im Muskel etc.) eingesetzt werden. Sinnesrezeptoren können zelluläre Einheiten (Sinneszellen) oder molekulare, nicht zelluläre, Einheiten sein. Ein Beispiel für einen nicht zellulären Rezeptor ist der Photorezeptor der einzelligen Augentierchen (*Euglena*). Im Folgenden wird nur auf zelluläre Rezeptoren weiter eingegangen.

### Photorezeptoren bei Augentierchen

Augentierchen bilden innerhalb der geißeltragenden eukaryotischen Einzeller eine eigene Gattung (*Euglena*). Vertreter der Euglenen sind zwischen 0,025 und 0,5 mm groß. Alle Arten haben den Namen gebenden rötlichen Augenfleck, der kein Auge, sondern ein Pigmentfleck ist. Der Pigmentfleck ist funktionell mit einem Photorezeptor als „Sinnesorgan“ aufgebaut. Der Photorezeptor ist hierbei keine Zelle. Euglenen bewegen sich fort, indem sie sich um die Längsachse drehen. Steht eine Lichtquelle senkrecht zum Augentierchen, erfolgt eine periodische Beschattung und Nicht-Beschattung, da sich der Pigmentfleck bei der Drehung um die Längsachse immer wieder zwischen Licht und Photorezeptor schiebt. Schwimmt ein Augentierchen auf die Lichtquelle zu, wird der Photorezeptor ohne Beschattung beleuchtet. Durch diesen Mechanismus können Augentierchen die Richtung, aus der das Licht kommt, erkennen.

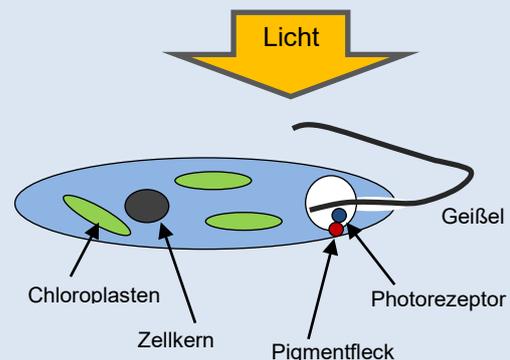


Abb. 7.7: Photorezeptor Euglena

Bild: Baur, 2016

### 7.2.1 Unterteilung von zellulären Sinnesrezeptoren

Zelluläre Sinnesrezeptoren sind Bestandteile von Sinnesorganen. Ein Sinnesorgan ist aus mehreren Zellen aufgebaut (Sinnesrezeptoren und anderen Zellen). Die spezifische Anordnung und Verbindung der Sinnesrezeptoren mit anderen Zellen lässt unterschiedliche Sinnesdetektionen mit auch gleichen Sinnesrezeptortypen zu. So können beispielsweise Mechanorezeptoren in Sinnesorganen zur Temperaturdetektion eingebunden sein (durch Wärme verdampfendes Wasser erhöht den Druck in einem Sinnesorgan, der Druck wird von einem Mechanorezeptor wahrgenommen) oder in Sinnesorganen zur Druckempfindung.

#### (A) Unterteilung nach dem Ursprung der Zelle

##### Primäre Sinneszellen

Primäre Sinneszellen sind Neuronen, die über ein Axon selbst ein Aktionspotenzial weiterleiten. Beispiele für primäre Sinneszellen sind die Druckrezeptoren der Wirbeltiere oder die freien Nervenendigungen zur Temperaturdetektion.

### **Sekundäre Sinneszellen**

Sekundäre Sinneszellen leiten nicht selbst Aktionspotenziale weiter, sondern übertragen das entstandene Rezeptorpotenzial über Transmitter an der Synapse auf eine nachfolgende Nervenzelle, die ein Aktionspotenzial aufbaut. Sekundäre Sinneszellen haben sich aus Gliazellen oder Epithelzellen entwickelt. Beispiele für sekundäre Sinneszellen sind die Haarsinneszellen in den Ohren der Wirbeltiere oder die Sehzellen der Wirbeltiere (Zapfen und Stäbchen).

### **(B) Unterteilung nach der Art der Detektion**

#### **Temperaturrezeptoren**

Temperaturrezeptoren reagieren unmittelbar auf Temperatur. So verändern spezielle freie Nervenendigungen ihre Durchlässigkeit für Ionen in Abhängigkeit zur Temperatur. Zum Teil finden bei den Tieren auch Mechanorezeptoren zur Wärmedetektion Verwendung. (Temperaturrezeptoren werden nachfolgend nicht vertieft, da sie wie Nervenzellen aufgebaut sind.)

#### **Mechanorezeptoren**

Die Mechanorezeptoren reagieren auf Druck, Dehnung, über eine spezielle Apparatur auch auf Schall, Bewegung, Wasserströmung oder Temperatur.

#### **Chemorezeptoren**

Der chemische Sinn ist vermutlich der älteste Sinn im Tierreich. Chemorezeptoren reagieren auf chemische Moleküle in der Luft, in der Nahrung oder im Wasser und machen dadurch die Fähigkeit zum Riechen oder Schmecken möglich.

#### **Photorezeptoren**

Die Photorezeptoren reagieren auf Licht (Photonen). Man geht davon aus, dass sich je nach Tiergruppe die Photorezeptoren entweder aus Chemorezeptoren oder Mechanorezeptoren entwickelt haben.

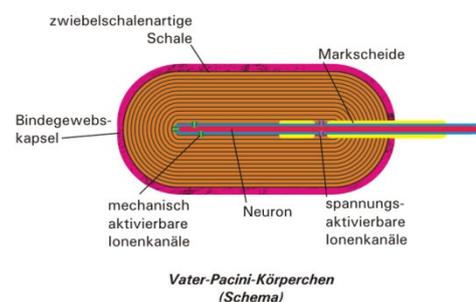
## **7.2.2 Mechanorezeptoren**

### **Anatomie**

Die Mechanorezeptoren können je nach Tiergruppe sehr unterschiedlich aufgebaut sein.

Bei Insekten (*Insecta*) bestehen sie aus einer Cuticularscheide (Kappe), die über einen Teil des Zellkörpers gestülpt ist (siehe Abb. 7.10). Die Cuticularscheide ist mit der Plasmamembran des überhüllten Zellbereichs verbunden. Im Zellkörper befinden sich Mikrotubuli. Die Mikrotubuli sind über eine Zwischensubstanz miteinander vereinigt. In die Plasmamembran sind dehnungsgesteuerte Ionen-Kanäle eingebaut, die auch mit den Mikrotubuli verbunden sind. Die Mechanorezeptoren sind in sogenannten Sensillen (Verbund von mehreren Zellen) eingebaut, wodurch sich eine Funktionseinheit ergibt. Sensillen sind kleine Sinnesorgane, die in oder auf der Cuticula angebracht sind, z. B. haarähnliche Strukturen.

Bei den Wirbeltieren (*Vertebrata*) kann man wiederum zwischen freien Nervenendigungen und Haarzellen unterscheiden.



**Abb. 7.8: Vater-Pacini-Lamellenkörperchen**

Bild: unbekannt, 2006

Die freien Nervenendigungen sind teilweise in zusätzlichen (zellulären) Strukturen eingebunden und bilden dadurch spezifische „Sinnesapparaturen“, die unterschiedliche Arten von Druck und Bewegung erfassen können. Ein Beispiel für solch eine „Mechanoapparatur“ sind die Vater-Pacini-Lamellenkörperchen, die Vibration registrieren und in der Haut liegen (siehe Abb. 7.3). Bei einem Vater-Pacini-Körperchen ist eine freie Nervenendigung in zwiebelschalenartige Lamellen (abgeplattete Perineuralzellen), die von einer Bindegewebskapsel umgeben werden, eingepackt. Vater-Pacini-Körperchen sind bis zu 2 mm groß.

Haarzellen bestehen aus einem Saum von Mikrovilli, den Stereovilli. Die Stereovilli sind durch Tip links miteinander verbunden (in Abb. 7.11; grün). Am Ende der Stereovillireihe befindet sich bei vielen Haarzellen ein Kinocilium (Zilie). In dem Kinocilium sind Mikrotubuli enthalten.



Abb. 7.9: Haarsinneszelle Wirbeltier

Aufnahme der Haarbündel zweier äußerer Haarzellen (nur bei Säugern) mit einem Rasterelektronenmikroskop. Bündelform: links V-Typ, rechts W-Typ

Bild: Kachar, 2014

**Physiologie**

Bei Insekten kommt es am Mechanorezeptor wie folgt zur Reizwahrnehmung: Durch einen Druck (Kompression) auf die Cuticularscheide kommt es zur Öffnung der Ionenkanäle. Durch die nun geöffneten Kanäle können Ionen (Kationen) einströmen und eine Depolarisation auslösen. Bei einem Zug an der Cuticularscheide kommt es zum Verschließen der Kanäle.

Bei den Wirbeltieren muss bei der Erklärung der Funktion zwischen den freien Nervenendigungen und den Haarsinneszellen unterschieden werden.

(1) Freie Nervenendigung

Bei den freien Nervenendigungen kommt es durch Zug oder Druck auf die Plasmamembran zum Öffnen (Aufspannen) von druckgesteuerten Ionen-Kanälen.

(2) Haarsinneszelle

Die Stereovillibündel werden durch Bewegung ausgeschert, da die Stereovilli (Mikrovilli) über Pro-

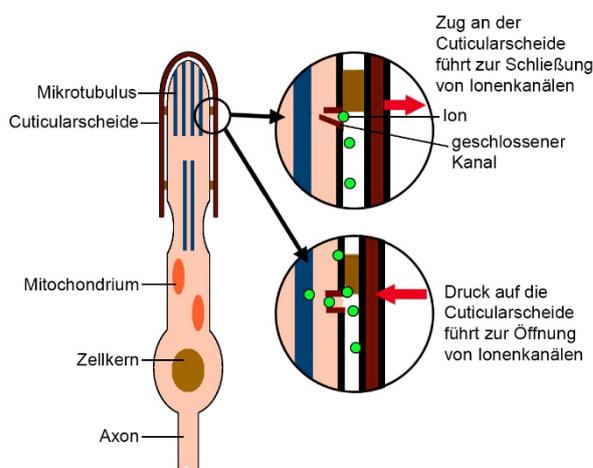


Abb. 7.10: Funktion Mechanorezeptor bei Insekten

Bild: Baur, 2020

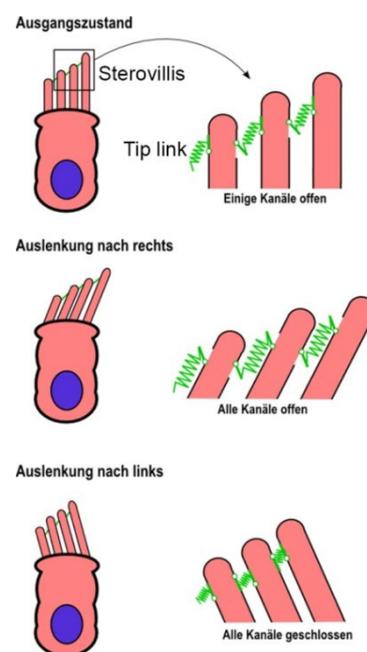


Abb. 7.11: Funktion Haarsinneszelle Wirbeltier

Bild: Schneider00, 2011

teinbrücken (Tip links) miteinander verbunden sind, kommt es zum Zug an den Tip links und dadurch zur Kanalöffnung. Die Öffnung der Kanäle führt zum Einströmen von Ionen (im menschlichen Ohr von  $K^+$ ) und dadurch zur Depolarisation.

### 7.2.3 Chemorezeptoren

#### Anatomie

Chemosinneszellen haben spezifische Rezeptoren in ihre Plasmamembran eingebaut. Je nach Art des Chemorezeptors (Riechsinneszelle, Geschmacksinneszelle) und Tiergruppe haben die Chemorezeptoren lange Dendriten oder viele Fortsätze (Cilien).

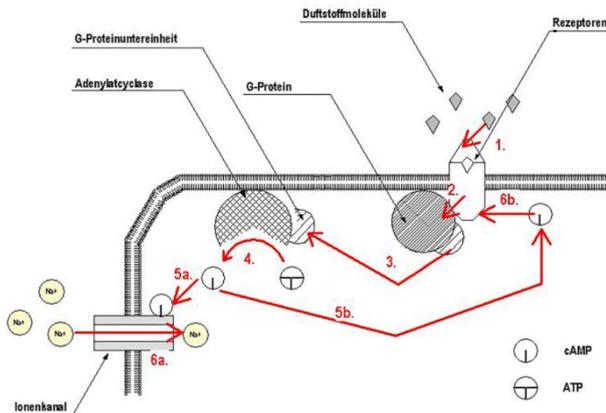


Abb. 7.12: Vorgänge an Riechzelle Mensch

Bild: Ppeeddeerr, 2007

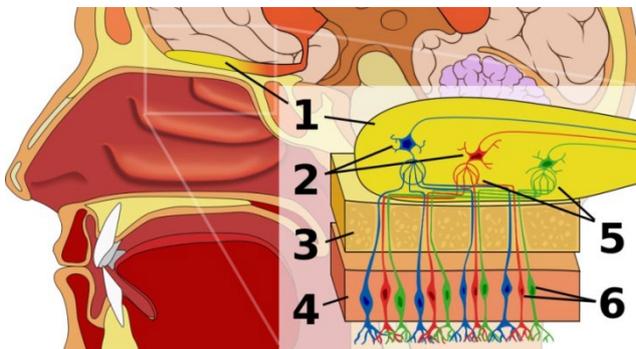


Abb. 7.13: Riechzellen Mensch

Sinnesorgan des menschlichen olfaktorischen Systems ist die Riechschleimhaut am Dach der Nasenhöhlen – zu den im Riechkolben (1, *Bulbus olfactorius*) gelegenen (sekundären) afferenten Nervenzellen (2, Mitralzellen) gelangen Nervenfasern durch den Schädelknochen (3, Siebbein) aus der Nasenschleimhaut (4, *Regio olfactoria*) von den (primären) Sinneszellen (6, Riechzellen) und bilden dort knäuelartige Verknüpfungsformen (5, *Glomeruli olfactorii*).

Bild: Chabacano, 2007

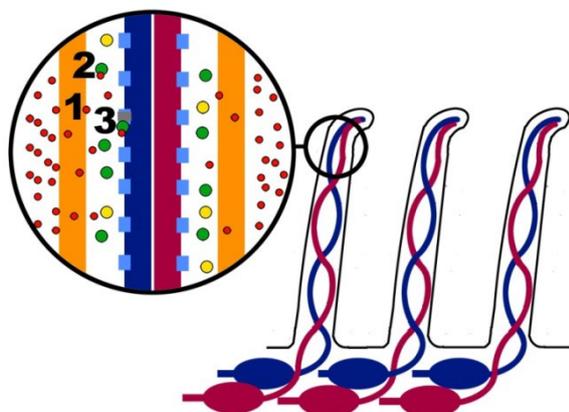


Abb. 7.14: Riechsensillen

Geruchssensillen an der Mottenantenne. Jedes Sensillum enthält zwei Geruchsrezeptorneuronen (rot und blau dargestellt).

(1) Duftmoleküle (dargestellt als hellrote Punkte) durchdringen die Wand des Sensillums (in der Wand sind Poren). (2) Duftmoleküle werden an duftstoffbindende Proteine (dargestellt als grüne Punkte) gebunden, die in der Lymphe der Sensillen enthalten sind. (3) Die duftstoffbindenden Proteine transportieren die Duftmoleküle zu den Rezeptorproteinen (dargestellt als hellblaue Vierecke) der Neuronen.

Jede Sorte von Duftmolekülen interagiert mit einem duftstoffbindenden Protein.

Bild: Baur, 2020

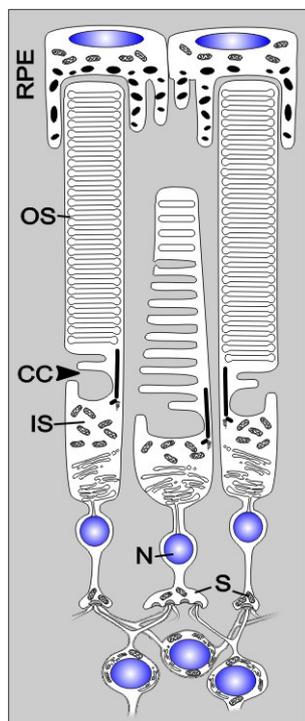
**Physiologie**

Der chemische Stoff verbindet sich mit einem Rezeptor der Zellmembran des Chemorezeptors. Bei manchen Stoffen verbindet sich der chemische Stoff zuerst mit einem Protein und das entstandene Molekül bindet am Rezeptor an. Der Rezeptor der Zellmembran ist im Inneren an ein G-Protein gebunden, an dem eine cytoplasmatische Signalkaskade ausgelöst wird. Die Signalkaskade führt letztendlich zur Öffnung von Ionenkanälen, was zum Einstrom von Kationen und dadurch zur Depolarisation führt. Die cytoplasmatische Signalkaskade soll exemplarisch am Beispiel von Riechzellen des Menschen dargestellt werden (siehe Abb. 7.12): (1) Spezifische Geruchsstoffe binden sich an Rezeptoren der Zellmembran (Cilienmembran). (2) Die Bindung an den Rezeptor aktiviert das G-Protein. (3) Das aktivierte G-Protein aktiviert wiederum die Adenylylcyclase (Synonym: Adenylatcyclase), die (4) den Umbau von ATP zu cAMP katalysiert. (5) cAMP öffnet Kationenkanäle, durch die (6) Na<sup>+</sup> und Ca<sup>2+</sup> einströmt.

**7.2.4 Photorezeptoren**

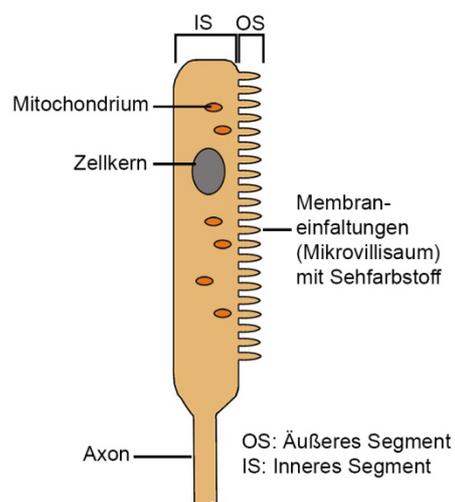
**Anatomie**

Photorezeptoren sind aus zwei unterscheidbaren Segmenten zusammengesetzt: aus dem Außensegment (Outer Segment [OS]) und dem Innensegment (Inner Segment [IS]). Das Außensegment besteht aus Membranstapeln. Bei den Stäbchen der Wirbeltiere sind die Stapel aus membranösen Disks und bei den Zapfen der Wirbeltiere und den Retinulazellen der Insekten sind dies Membraneinfaltungen (vgl. Abb. 7.15 und 7.16). In der Membran der Disks und der Einfaltungen sind Sehpigmente (z. B. Rhodopsin) eingebettet. Das Innensegment ist der Zellbereich, in dem sich der Zellkern und Stoffwechselapparat befindet. Die Photorezeptoren der Insekten haben ein langes Axon (primäre Sinneszellen), die der Wirbeltiere hingegen nicht (sekundäre Sinneszellen).



**Abb. 7.15: Photorezeptoren Wirbeltiere**  
 Mitte: Zapfen  
 Links und rechts: Stäbchen  
 RPE: Retinales Pigmentepithel  
 OS: Äußeres Segment  
 CC: Verbindungscilium  
 IS: Inneres Segment  
 N: Zellkern  
 S: Synaptische Endigung

Bild: Jan R., 2005, leicht verändert



**Abb. 7.16: Photorezeptor (Retinulazelle) Gliederfüßer**

Bild: Baur, 2019

**Physiologie**

In den Photorezeptoren werden Photonentreffer in elektrische Signale (Aktionspotenziale) umgewandelt. Jeder Photorezeptor wird je nach spezialisiertem Farbbereich (beispielsweise Zapfen: Rot,

Blau, Grün) durch den Energiegehalt des entsprechenden Photons (Energiegehalt der Wellenlänge) aktiviert (mehr hierzu in der Vorlesung Zoologie II).

## 7.3 Sinnesorgane

### 7.3.1 Das Randsinnesorgan (Rhopalium) der Schirmquallen

Schirmquallen (*Scyphozoa*), beispielsweise die Ohrenqualle (*Aurelia aurita*), besitzen wie Würfelquallen (*Cubozoa*) Randsinnesorgane an ihrem Schirmrand (siehe Abb. 7.17 und 7.18). Die Randsinnesorgane heißen Rhopalien (Singular Rhopalium) und bestehen aus einem vom Schirmrand abstehenden Kolben. Die distalen (vom Körper entfernt liegenden) Zellen des Kolbens sind mit Kristallen (Statolithen) aus Calciumsulfat-Hemihydrat angereichert. Der Kolben bewegt sich wie ein Pendel und seine Bewegung wird von Sinneszellen (Haarsinneszellen) registriert. Am Kolben sind bei den Ohrenquallen noch ein Flächen- und ein Becherauge (Äuglein: Ocellus) vorhanden (bei Würfelquallen Linsenaugen). Sinnesgruben in der Nähe der Rhopalien beinhalten Chemorezeptoren.



Abb. 7.17: Rhopalium Ohrenqualle

Bild: unbekannt, 2007

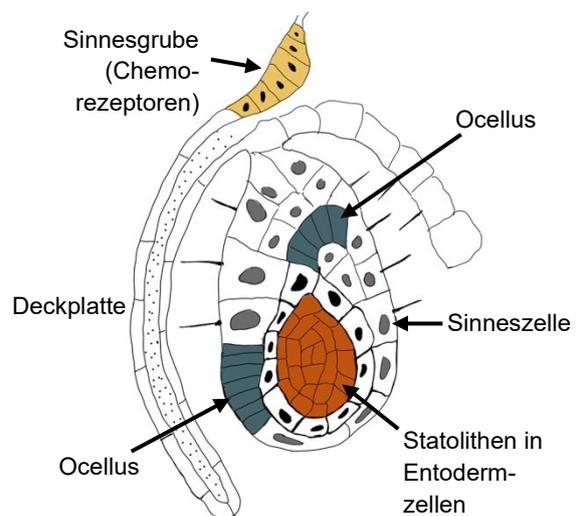


Abb. 7.18: Rhopalium Bau

Bild: Baur, 2020

### 7.3.2 Seitenlinienorgan

Das Seitenlinienorgan ist ein Wahrnehmungssystem für Wasserströmungen und findet sich bei Fischen und Amphibien. Neuromasten (Rezeptorzellen) sind über den Körper verstreut auf der Körperoberfläche angebracht. Ein Neuromast besteht aus Haarsinneszellen, deren Haare in eine galertige keilförmige Struktur (Cupula) eingebunden sind. Durch Wasserströmung wird die Cupula bewegt und dadurch die Haare der Haarsinneszellen ausgelenkt. Bei den meisten Fischen liegen die Cupulae in Kanälen (Seitenlinien), die unterhalb der Epidermis liegen. Die Kanäle haben viele Öffnungen nach außen. Wasserströmungen oder Erschütterungen bewegen das Wasser in den Kanälen, was zur Biegung der jeweiligen Cupula eines Neuromasts und dadurch zum Reiz führt.

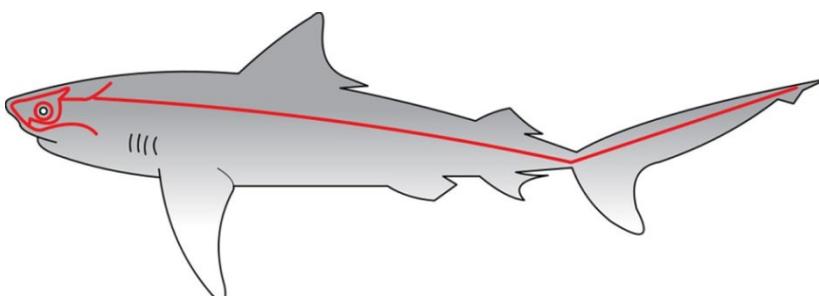


Abb. 7.19: Lage Seitenlinienorgan Hai

Bild: Chris huh, 2007

### 7.3.3 Jakobson Organ

Das Jakobson Organ ist ein Geruchsorgan (Organ mit Chemorezeptoren), das man bei vielen Wirbeltieren findet (Synonym: Vomeronasales Organ). Die Höhlen der schlauchartigen Einbuchtungen, die unterhalb des Nasenseptumknorpels und oberhalb des Pflugscharbeins liegen (Übergang Nase-Rachen), sind für Atemluft normalerweise nicht zugänglich. Geruchsmoleküle werden mit dem Schleim der Nasenschleimhaut durch Gefäßerweiterungen und -verengungen (gelegentlich mit Muskelzellen) in das Lumen der Einbuchtungen gesogen bzw. wieder herausgedrückt (Pumpmechanismus).

Bei Schlangen werden Geruchsstoffe (Moleküle) über die Zunge, die in das Jakobson Organ geschoben wird, auf den Flüssigkeitsfilm des Sinnesepithels des Jakobson Organs übertragen. Da die Zunge der Schlangen gespalten und das Jakobson Organ paarig ist, ist ein Richtungs-zuordnung der Geruchsstoffe möglich.

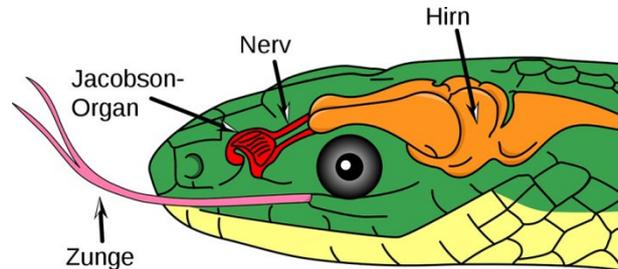


Abb. 7.20: Jakobson Organ Schlange

Bild: Fred the Oyster, 2019



### Nachbereitung/Übung

#### Aufgabe 1: Erklären/definieren Sie die Begriffe:

Aktionspotenzial	Rezeptorpotenzial	Sinnesorgan
Grubenorgan	Rhodopsin	Sinneszelle
Haarsinneszelle	Rhopalium	Stäbchen
Jakobson Organ	Seitenlinienorgan	Umweltreiz
Retinulazelle	Sensillen	Zapfen
Rezeptor	Sinn	

#### Aufgabe 2:

- (1) Führen Sie die verschiedenen Sinne auf.
- (2) Was versteht man unter der Polarisation des Lichts? [●]
- (3) Welche Typen von Sinnesrezeptoren gibt es?
- (4) Wie ist ein Mechanorezeptor aufgebaut?
- (5) Wie funktioniert ein Mechanorezeptor?
- (6) Wie ist ein Chemorezeptor aufgebaut?
- (7) Wie funktioniert ein Chemorezeptor?
- (8) Wie ist ein Photorezeptor aufgebaut?
- (9) Wie funktioniert ein Photorezeptor?
- (10) Suchen Sie ein Bild einer Motte und betrachten Sie die Antennen mit Riechsensillen. [●]

----

## Literatur

- Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierend: Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Urry, L. A. (2015). *Biologie* (10., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Clarke, D., Whitney, H., Sutton, G. & Robert, D. (2013). Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. *Science* 340, 66–69.
- Goldschmid, A. & Angermann, R. (2015). *Spezielle Zoologie: Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere* (3., neu bearb. u. aktualisierte Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- 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* (13., aktualisierte Auflage). München: Pearson.
- Hildebrandt, J.-P., Bleckmann, H. & Homberg, U. (2015). *Penzlin – Lehrbuch der Tierphysiologie* (8. Auflage). Heidelberg: Springer Spektrum.
- 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: Thieme Verlag.
- Westheide, W. & Alberti, G. (2013). *Spezielle Zoologie: Teil 2: Einzeller und wirbellose Tiere* (3. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.

## Abbildungen

- Abbildung 7.1: **Antennen und Komplexaugen Wespe**. Bild von: unbekannt; 2006; Lizenz: Bild auf Pixabay; verfügbar unter: <https://pixabay.com/de/photos/wespe-deutsch-wespe-538471/>
- Abbildung 7.2: **Grubenorgan Schlange**. Ursprünglicher Bildtitel: The Pit Organs of Two Different Snakes; Bild von: skeeze; 2009; Lizenz: CC BY-SA 4.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Grubenorgan\\_und\\_Labialgruben#/media/Datei:The\\_Pit\\_Organs\\_of\\_Two\\_Different\\_Snakes.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Grubenorgan_und_Labialgruben#/media/Datei:The_Pit_Organs_of_Two_Different_Snakes.jpg)
- Abbildung 7.3: **Rezeptoren der Säugetierhaut**. Aus: Baur, A. (2015). *Humanbiologie für Lehramtsstudierende. Ein Arbeits- und Studienbuch*. Berlin: Springer Spektrum.
- Abbildung 7.4: **Schnitt durch den Kopf eines Zahnwals**. Ursprünglicher Bildtitel: Schnitt durch den Kopf eines Zahnwals, Melone orange; Bild von: Martin-rnr; 2011; Lizenz: CC0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Melone\\_\(Wal\)#/media/Datei:Dolphin\\_head\\_section.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Melone_(Wal)#/media/Datei:Dolphin_head_section.svg)
- Abbildung 7.5: **Erdmagnetfeld**. Ursprünglicher Bildtitel: Die Feldlinien des Erdmagnetfelds; Bild von: Geek3; 2010; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetsinn#/media/Datei:VFPT\\_Dipole\\_field.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetsinn#/media/Datei:VFPT_Dipole_field.svg)
- Abbildung 7.6: **Seitenlinienorgan Bachforelle**. Ursprünglicher Bildtitel: Bachforelle; Bild von: Apple2000; 2014; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Forelle#/media/Datei:Salmo\\_trutta\\_fario-1.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Forelle#/media/Datei:Salmo_trutta_fario-1.jpg); Bild vom Autor verändert.
- Abbildung 7.7: **Photorezeptor Euglena**. Bild von: Armin Baur; 2016.
- Abbildung 7.8: **Vater-Pacini-Lamellenkörperchen**. Ursprünglicher Bildtitel: Vater-Pacini-Körperchen, Schema; Bild von: unbekannt; 2006; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Vater-Pacini-Körperchen#/media/Datei:Vater\\_Pacini\\_Körperchen.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Vater-Pacini-Körperchen#/media/Datei:Vater_Pacini_Körperchen.png)
- Abbildung 7.9: **Haarsinneszelle Wirbeltier**. Ursprünglicher Bildtitel: Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop der Haarbündel zweier äußerer Haarzellen (nur bei Säugern). Bündelform: links V-Typ, rechts W-Typ; Bild von: B. Kachar, NIDCD; 2014; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stereocilia.jpg>
- Abbildung 7.10: **Funktion Mechanorezeptor bei Insekten**. Bild von: Armin Baur; 2020.

Abbildung 7.11: **Funktion Haarsinneszelle Wirbeltier**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung der Kanalverhältnisse einer Haarsinneszelle bei Auslenkung; Bild von: Schneider00; 2011; Lizenz: CC BY-SA 3.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Haarzelle#/media/Datei:Kanäle\\_einer\\_Haarsinneszelle.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Haarzelle#/media/Datei:Kanäle_einer_Haarsinneszelle.png)

Abbildung 7.12: **Vorgänge an Riechzelle Mensch**. Ursprünglicher Bildtitel: Chemoelektrische Auslösung einer Erregung in Riechsinneszellen; Bild von: Ppeedddeerr; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Olfaktorische\\_Wahrnehmung#/media/Datei:Chemoelektrische\\_Auslösung\\_einer\\_Erregung\\_in\\_Riechsinneszellen.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Olfaktorische_Wahrnehmung#/media/Datei:Chemoelektrische_Auslösung_einer_Erregung_in_Riechsinneszellen.JPG)

Abbildung 7.13: **Riechzellen Mensch**. Ursprünglicher Bildtitel: Olfactory system; Bild von: Chabacano; 2007; Lizenz: CC BY-SA 2.5; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Olfaktorische\\_Wahrnehmung#/media/Datei:Olfactory\\_system.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Olfaktorische_Wahrnehmung#/media/Datei:Olfactory_system.svg)

Abbildung 7.14: **Riechsensillen**. Bild von: Armin Baur, 2020; in Anlehnung an: Max-Planck-Institut für chemische Ökologie; 2007; verfügbar unter: <https://www.mpg.de/424556/forschungsSchwerpunkt1>

Abbildung 7.15: **Photorezeptoren Wirbeltiere**. Ursprünglicher Bildtitel: Schematische Darstellung von Stäbchen (außen) und Zapfen (innen) in der Netzhaut; Bild von: Jan R.; 2005; Lizenz: CC SA-BY 2.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fotorezeptor#/media/Datei:Schema\\_Retina.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Fotorezeptor#/media/Datei:Schema_Retina.jpg)

Abbildung 7.16: **Photorezeptor (Retinulazelle) Gliederfüßer**. Bild von: Armin Baur, 2019.

Abbildung 7.17: **Rhopalium Ohrenqualle**. Ursprünglicher Bildtitel: Rhopalia der Ohrenqualle; Bild von: unbekannt; 2007; Lizenz: CC SA-BY 2.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Rhopalium#/media/Datei:Jelly\\_cc7.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Rhopalium#/media/Datei:Jelly_cc7.jpg)

Abbildung 7.18: **Rhopalium Bau**. Bild von: Armin Baur, 2020.

Abbildung 7.19: **Lage Seitenlinienorgan Hai**. Ursprünglicher Bildtitel: Schema zur Lage des Seitenlinienorgans (rote Linien) bei einem Hai; Bild von: Chris huh; 2007; Lizenz: Public domain; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Seitenlinienorgan#/media/Datei:Sharks\\_Lateral\\_Line.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Seitenlinienorgan#/media/Datei:Sharks_Lateral_Line.svg)

Abbildung 7.20: **Jakobson Organ Schlange**. Ursprünglicher Bildtitel: Schema des Jacobson-Organ bei einem Reptil; Bild von: Fred the Oyster; 2019; Lizenz: CC SA-BY 4.0; verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Jacobson-Organ#/media/Datei:Jacobson's\\_organ\\_in\\_a\\_reptile\\_de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Jacobson-Organ#/media/Datei:Jacobson's_organ_in_a_reptile_de.svg)