

Alle startlearnING-Lerngelegenheiten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie auf einem biologischen Phänomen aufbauen. Im Falle der Bewegung ist es die Beugung und Streckung des Unterarms, die ein gängiges Beispiel in den meisten Lehr- und Bildungsplänen der Unterstufe darstellt.

Dieses Phänomen wird ergänzt durch Betrachtungen analoger Strukturen bei Exoskeletten und hydrostatischen Skeletten.

Im Folgenden werden hierzu die Sachinformationen präsentiert, die erklären, wie durch das Zusammenspiel von Knochen, Gelenken und Muskeln Bewegungen ermöglicht werden. Im biologischen Teil des Unterrichts wird das Ziel darin bestehen, das Zusammenspiel von Muskelgruppen untereinander und von Muskelgruppen und anderen Strukturen zu erarbeiten. Hierbei kommt es zur Verwendung und zur Entwicklung von Modellen, mit denen das Zusammenspiel aus starren und beweglichen Teilen zur Erzeugung von Bewegung erklärt werden kann.

1. Bewegung und ihre Ursachen

Bewegung, also die Fähigkeit zur Veränderung der Lage und Position, wird in der Biologie als ein Merkmal des Lebendigen beschrieben. Die biomechanischen Prozesse, die eine Ausführung der Bewegung ermöglichen, genauer genommen, welche die hierfür benötigte Energie liefern, können in zwei Kategorien unterteilt werden.

Auf der einen Seite stehen Bewegungen, die durch osmotische Prozesse hervorgerufen werden. Hierbei werden unterschiedliche Druckverhältnisse in den Zellen oder in speziellen Geweben erzeugt, die eine Verformung des Gewebes oder der Zelle bewirken. Diese Verformung führt zu einem Spannungsaufbau, dessen Energie zur Ausführung einer Bewegung nutzbar wird. Diese Form der Bewegungserzeugung findet sich hauptsächlich bei Pflanzen, Pilzen und nur vereinzelt im Tierreich (Sakes, van der Wiel, Henselmans, van Leeuwen, Dodou & Breedveld, 2016, 40).

Auf der anderen Seite stehen Bewegungen, die durch kontraktile Elemente erzeugt werden. Als Beispiele für diese kontraktile Elemente dienen Mikrotubuli und Muskelzellen. Diese Strukturen können sich verkürzen (= Kontraktion), wodurch eine Zugkraft erzeugt wird. Diese Zugkraft wirkt dann auf angrenzende Strukturen ein und sorgt für deren Bewegung (Sakes et al., 2016, 31f.).

In dieser Unterrichtseinheit liegt der Fokus auf einer durch Muskeln erzeugten Bewegung. Um deren Funktionsweise genau zu verstehen, erfolgt nun eine Betrachtung des Aufbaus eines Muskels.

2. Aufbau der Muskulatur

Wie Abb. 3 zeigt, besteht ein Muskel aus mehreren Muskelfaserbündeln, die mehrere Muskelfasern umfassen. Die Muskelfasern sind schlauchartige Strukturen, die sich wiederum in kleinere Strukturen, die Myofibrillen, unterteilen lassen. Die Myofibrillen verlaufen parallel entlang der Muskelfaser. Sie bestehen aus aneinander gereihten Funktionseinheiten, den Sarkomeren, die eine Kontraktion ermöglichen.

Die Sarkomere bestehen im Wesentlichen aus zwei überlappenden Filamenten, den Aktinfilamenten und den Myosinfilamenten. Diese lassen sich bei einer Muskelkontraktion ineinander verschieben, wodurch sich die Muskellänge verkürzt (Müller & Frings, 2004, 383-385).

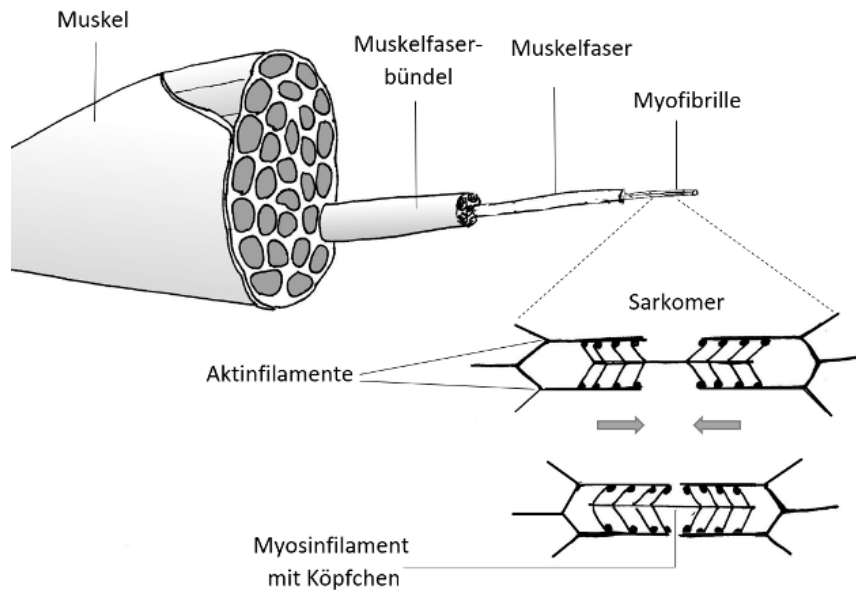


Abb. 3: Aufbau eines Muskels

3. Wie ein Muskel kontrahiert

Ein Myosinfilament wird von Aktinfilamenten umgeben und besitzt kleine köpfchenartige Strukturen, die sich an Bindungsstellen des Aktinfilaments binden können. Diese köpfchenartigen Strukturen können nach der Bindung an das Aktinfilament abknicken und einen Ruderschlag erzeugen. Durch den Ruderschlag verschieben sich das Aktin- und Myosinfilament stärker ineinander und die Gesamtlänge des Sarkomers verkürzt sich. Durch die Gesamtheit der Verkürzungen der Sarkomere eines Muskels, verkürzt sich auch dieser und es kommt zur Muskelanspannung (= Kontraktion).

Der Ruderschlag der Myosinköpfchen ist jedoch nur in eine Richtung möglich. Dies hat zur Folge, dass sich Muskeln nur anspannen können (Müller & Frings, 2004, 392; Sadava, Hillis D.M., Heller & Berenbaum, 2011, 1334).

Für ein Auseinanderziehen der ineinander verschobenen Aktin- und Myosinfilamente bedarf es eines Gegenspielers, der den angespannten Muskel dehnt. Häufig ist dieser Gegenspieler ein anderer Muskel auf der gegenüberliegenden Seite des zu bewegenden Organs.

Kontrahiert ein für eine Bewegung verantwortlicher Muskel, wird dessen Gegenspieler aufgrund seiner Lage gedehnt. Soll die Bewegung rückgängig gemacht werden, kontrahiert der vorherige Gegenspieler. Dies führt wiederum zu einer Dehnung des zuvor angespannten Muskels. Manchmal können aber auch die Schwerkraft oder eine nicht komprimierbare Flüssigkeit dazu führen, dass ein angespannter Muskel wieder gedehnt wird (Müller & Frings, 2004, 392).

4. Durch Muskeln erzeugte Bewegung bei unterschiedlichen Skeletttypen

Bewegungen im Tierreich werden hauptsächlich durch Muskeln verursacht. Die Kontraktion der Muskeln stellt dabei die benötigte Antriebskraft für die Bewegung zur Verfügung. Trotz dieser Gemeinsamkeit lassen sich Unterschiede der Bewegungsphysiologie erkennen und unterteilen (s. Abb. 4).

Die erste Unterscheidungsebene besteht im Fehlen oder dem Vorhandensein von starren Elementen. Sind starre Elemente vorhanden, bilden diese ein Skelett, das entweder innenliegend (= Endoskelett) oder außenliegend (= Exoskelett) ist. Endoskelette finden wir bei den Wirbeltieren, wohingegen Exoskelette ein typisches Merkmal der Gliederfüßer (= Arthropoden, zu ihnen zählen Insekten, Spinnentiere, Tausendfüßer und Krebstiere) sind.

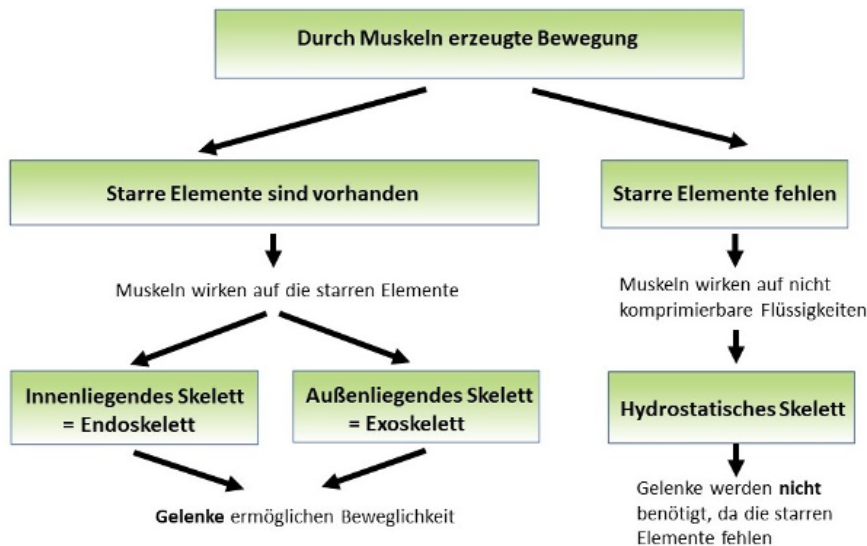


Abb. 4: Einteilung von Umsetzungsformen durch Muskeln erzeugter Bewegung im Tierreich

Die Muskulatur ist über ein Bindegewebe mit den starren Elementen verbunden und kann ihre Zugkraft auf selbige ausüben. Die starren Skelettelemente sind häufig über Gelenke miteinander verbunden. Diese ermöglichen erst eine Beweglichkeit der Skelette.

Bei einigen Tieren fehlen starre Strukturen völlig, dennoch sind sie dazu in der Lage, sehr kraftvolle Bewegungen auszuführen. Der Grund hierfür liegt in einem sehr komplexen Gegenspielersystem von unterschiedlichen Muskelgruppen, die wechselseitig aufeinander reagieren. Kontrahieren Muskeln in einem hydrostatischen Skelett, üben diesen Druck auf inter- und intrazelluläre Flüssigkeiten des Gewebes aus. Diese Flüssigkeiten werden daraufhin verschoben und führen zu einer Verformung des Gewebes (Sadava et al., 2011, 1345).

Im Folgenden werden die soeben beschriebenen, durch Muskeln erzeugten Bewegungen bei unterschiedlichen Skelett-Typen vorgestellt. Stellvertretend für Bewegungen mit einem Endoskelett, erfolgt eine Beschreibung der Bewegung eines Unterarms. Diesem schließt sich eine Betrachtung einer Bewegungsentwicklung bei einem Exoskelett am Beispiel eines Insektenbeins an. Anschließend erfolgen Erläuterungen über die Bewegung eines Oktopusarms und eines Elefantenrüssels, die exemplarisch für die Bewegungen bei einem hydrostatischen Skelett stehen.



Abb. 5: Der Röntgenblick zeigt nicht alles. Bei der Bewegung des Armes arbeiten Knochen mit Gelenken und Muskeln im Team zusammen.

5. Der Ellbogen und das Ellbogengelenk

Oberarmknochen, Elle und Speiche bilden gemeinsam das Ellbogengelenk, das genau genommen aus zwei Gelenken besteht: Dem Ellengelenk zwischen Elle und Oberarmknochen und dem Speichengelenk zwischen Speiche und Elle. Die Elle führt von den kleinen Fingern der Hand zum Oberarm. Sie weist am Übergang zum Oberarm eine Aussparung auf, die als Gelenkpfanne für das Ellbogengelenk fungiert. Die Speiche entspringt an der Daumenseite des Unterarms und führt von dort zum Oberarmknochen. Oberarmspeichenmuskel (*M. brachioradialis*), Oberarmmuskel (*M. brachialis*) und Bizeps (*M. biceps brachii*) bilden die Flexoren, also Beugergruppe des Ellbogens, die den Unterarm relativ zum Oberarm bewegt. Ihnen stehen die Extensoren oder die Strecker Trizeps (*M. triceps brachii*) und Ellenbogenhöckermuskel (*M. anconeus*) als Gegenspieler gegenüber. Skelettmuskeln ermöglichen Bewegungen, indem Kraft über Sehnen auf Knochen übertragen wird. Dazu sind die Sehnen (meist) an Knochen befestigt. Sie kreuzen mindestens ein Gelenk, manchmal aber auch mehrere Gelenke, wobei die Kraftentfaltung umso günstiger ist, desto weniger Gelenke von einem Muskel überbrückt werden. Bei der Kontraktion werden die gelenkbildenden Knochen aufeinander zu bewegt. Im Falle des Ellbogengelenks werden Elle und Speiche zum Oberarmknochen hingezogen, der nahezu in seiner Ausgangsstellung verbleibt. Die Veränderung der Lage ist ein wichtiges Kriterium bei der Benennung der Muskeln. Der Ort, an dem die Sehne des Muskels am bewegten Knochen angreift, wird als Ursprung bezeichnet. Der Ort, an dem die Muskelsehne am bewegten Knochen befestigt ist, heißt Ansatz. Der Bizeps beispielsweise hat seinen Namen von seinen zwei Ursprüngen (oder Köpfen, daher die Bezeichnung *ceps*, von lat. *Caput*), die beide am Schulterblatt entspringen. Zur Unterscheidung von einem zweiten Bizeps in unserem Körper, dem Schenkelbeuger-Muskel (*M. biceps femoris*), enthält die lateinische Muskelbezeichnung den Herkunftszusatz *brachii* (von *Brachium* - lat. Oberarm) im Vergleich zu *Femoris* (lat. für Oberschenkel) (Weitzel, 2014).

Zwar sind alle Beuger und Strecker an der Bewegung des Ellbogens beteiligt, jedoch nicht alle in gleicher Weise. Der Oberarmspeichenmuskel etwa entfaltet seine Leistung immer dann besonders effektiv, wenn Bewegungen rasch erfolgen oder wenn ein Gewicht besonders langsam während der Bewegung angehoben werden soll.

Häufig liegen Muskeln nicht in dem Körperteil, das sie bewegen. Die Muskelbäuche (die fleischigen Anteile eines Muskels) von Bizeps und Trizeps finden sich beispielsweise am Oberarm, während die Hauptfunktion beider Muskeln darin besteht, den Unterarm zu bewegen. Anders ist es beim Ellenbogenhöckermuskel, der den Trizeps bei der Streckung des Unterarms unterstützt. Sein Bauch liegt an der Elle, also in dem Körperteil, das bewegt wird. Neben den bereits genannten existieren weitere Muskeln, die an Elle und Speiche ansetzen (vgl. Tabelle 1). Ihre Aufgabe besteht darin, das Speichen- oder Radioulnargelenk zu bewegen (Weitzel, 2014).

Muskel	Ursprung	Ansatz	Funktion
Unterarmbeuger			
Bizeps (<i>M. biceps brachii</i>)	Schulterblatt	Raue Fläche auf der Vorderseite der Speiche unterhalb des Ellbogengelenks	Beugung des Ellbogens, Beugung im Schultergelenk, Auswärtsdrehung (Supination) der Hand durch Drehung des Radioulnargelenks
Oberarmmuskel (<i>M. brachialis</i>)	Oberarmknochen	Raue Fläche auf der Vorderseite der Elle unterhalb des Ellbogengelenks	Beugung des Ellbogens, kräftiger als Bizeps (!)
Oberarmspeichenmuskel (<i>M. brachioradialis</i>)	Oberarmknochen	Speiche	Beugung des Ellbogens, Ein- und Auswärtsdrehung des Radioulnargelenks
Unterarmstrecker			
Trizeps (<i>M. triceps brachii</i>)	1 Ursprung am Schulterblatt (<i>Caput longum</i>), 2 am Oberarmknochen	Hinterseite der Elle	Streckung des Ellbogens, Streckung im Schultergelenk
Ellenbogenhöckermuskel (<i>M. anconeus</i>)	Oberarmknochen	Hinterseite der Elle	Streckung des Ellbogens, Streckung im Schultergelenk

Tab. 1: Auf Elle und Speiche einwirkende Muskeln

6. Gelenke als Schlüsselstellen für Bewegung

Erst die Gelenke ermöglichen dem Körper, aufgrund der Festigkeit der Knochen, Bewegungen. Abgesehen von planen Gelenken (wie in der Wirbelsäule) findet man bei Gelenk bildenden Knochen jeweils einen Gelenkkopf und eine Gelenkpfanne, zwischen denen der Gelenkspalt liegt. Eine Knorpelschicht an den Berührungsstellen vermindert die Reibung zwischen Kopf und Pfanne. Das Gelenk wird von einer festen Haut, der Gelenkkapsel, vollständig umschlossen. Neben dem Abschluss des Gelenkes nach außen, ist ihre Aufgabe die Ernährung und Schmierung des Gelenks durch die Bereitstellung von Gelenkschmiere, die den Gelenkknorpel ernährt und die Reibung zwischen Gelenkkopf und -pfanne weiter herabsetzt. Die Einteilung von Gelenken erfolgt nach der Gestalt der Gelenkoberfläche, die unterschiedliche Formen von Bewegungen ermöglicht. Das Ellengelenk ist ein Scharniergelenk, da es wie ein Türscharnier nur winkelförmige Bewegungen zulässt. Anatomisch verantwortlich hierfür ist der konvex gestaltete Gelenkkopf des Oberarms, der in die konkave Aussparung der Gelenkpfanne der Elle reicht. Das Speichengelenk ist ein Radgelenk. Die Speiche ist durch ein ringförmiges Band mit der Elle verbunden, wo durch eine Drehbewegung um die Längsachse der Speiche ermöglicht wird. So können wir unsere Handflächen nach unten und nach oben drehen (Weitzel, 2014).

7. Das Insektenbein - Konsequenzen eines Exoskelettes

Wie alle Gliederfüßer (Arthropoden) besitzen auch Insekten ein stabiles Außenskelett (= Exoskelett). Dieses Exoskelett besteht aus mehreren Eiweißstrukturen, in die das Kohlenhydrat Chitin eingebettet ist. Die Zusammensetzung der Eiweißstrukturen entscheidet dabei über Festigkeit, Elastizität und Härte des Außenskeletts (Campbell, Reece, Held, & Markl, 2003, 1287).

Das Exoskelett umschließt das Insekt vollkommen, wie eine Ritterrüstung. Es dient als Stützapparat und schützt alle innenliegenden Organe. Um eine Beweglichkeit zu ermöglichen, besteht das Exoskelett aus mehreren Chitinplatten, die über weiche Gelenkhäute miteinander verbunden sind. Diese Strukturen können analog zu den Gelenken bei den Endoskeletten gesehen werden.

Exoskelette bieten ihren Trägern aufgrund ihrer Stabilität einen guten Schutz, gleichzeitig haben sie den Nachteil, dass sie nicht mitwachsen, sondern einer Häutung des Organismus bedürfen (Campbell et al., 2003, 1285). Des Weiteren sind Exoskelette sehr schwer und grenzen die Beweglichkeit eines Organismus ein.

Welche Mechanismen eine Bewegung bei einem Exoskelett ermöglichen, wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel eines Insektenbeins aufgezeigt.

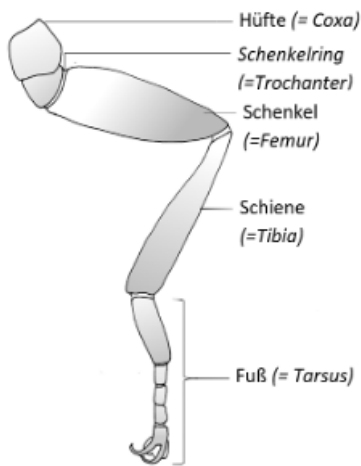


Abb. 6: Aufbau eines Insektenbeins

Bewegung eines Insektenbeins

Das Bein eines Insekts (vgl. Abb. 6) besteht im Wesentlichen aus 5 Röhrenelementen: der Hüfte (= *Coxa*), dem Schenkelring (= *Trochanter*), dem Schenkel (= *Femur*), der Schiene (= *Tibia*) und dem Fuß (= *Tarsus*). Diese sind über Gelenkhäute miteinander verbunden. Die Muskulatur der Insekten setzt im Inneren der Röhrenelemente direkt oder indirekt über Bindegewebsstrukturen am Exoskelett an und verbindet nebeneinandergelegene Röhrenelemente (Bauer & Dettner, 1999, 198-200). Wie beim Ellenbogengelenk beschrieben, gilt auch bei den Muskeln des Exoskeletts das Gegenspielerprinzip.

In Abbildung 7 verbinden die Muskeln A und B die röhrenförmigen Exoskelettelemente von Schenkel (= *Femur*) und Schiene (= *Tibia*). Die beiden Muskeln sind hier Gegenspieler. Kontrahiert Muskel A, so wird die Schiene herangezogen und das Bein beugt sich. Muskel B wird aufgrund seiner Lage dabei gedehnt. Kontrahiert Muskel B, führt dies zur Streckung des Beines, der Muskel A wird gedehnt. Bewegungen mit einem Exoskelett folgen also demselben Prinzip wie Bewegungen mit einem Endoskelett. Lediglich der Aufbau ist invers.

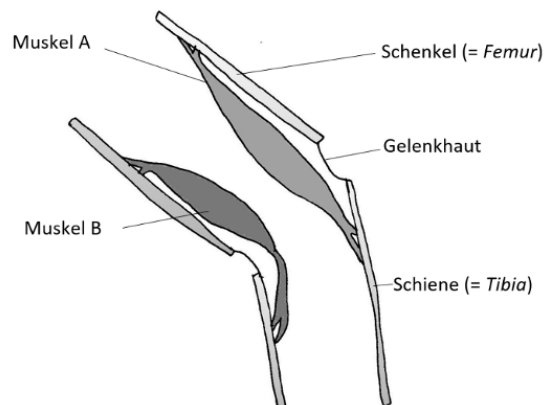


Abb. 7: Schematischer Längsschnitt durch ein Insektenbein

8. Konsequenzen von hydrostatischen Skeletten

Die biomechanische Funktionsweise der Muskeln, also ihre Kontraktionsfähigkeit und die Tatsache, dass sich Muskeln nicht eigenständig dehnen können, hat auch bei den hydrostatischen Skeletten Gültigkeit. Anders als bei Endo- und Exoskeletten fehlt es hydrostatischen Skeletten aber an starren Elementen. Sie verfügen weder über Knochen noch über verhärtete Chitinplatten, die eine stützende Wirkung haben könnten. Die Stützfunktion bei hydrostatischen Skeletten wird durch zwei Faktoren ermöglicht. Zum einen aus der Kraft der Muskulatur, zum anderen aus den inneren Druckverhältnissen, die durch nicht omprimierbare Flüssigkeiten im Zellinnern oder in interzellularen Räumen entstehen (Campbell et al., 2003, 1287; Kier & Smith, 1985, 308f.).

Bei hydrostatischen Skeletten kann die Muskulatur ihre Kraft nicht auf starre Elemente ausüben. Stattdessen wirkt die Muskelkraft auf die beschriebenen Flüssigkeiten im Inneren des Organismus (Campbell et al., 2003, 1287). Auch bei hydrostatischen Skeletten gibt es ein Gegenspielerprinzip. Die entsprechenden Gegenspielermuskeln agieren dabei nicht direkt miteinander, sondern führen zu einer Lageveränderung der Gewebsflüssigkeiten, die dann zur Dehnung der Antagonisten führt. Vereinfacht betrachtet findet sich bei hydrostatischen Skeletten ein Wechselspiel von zwei bis drei unterschiedlich angeordneten Muskelgruppen, der Längsmuskulatur und der Quermuskulatur bzw. einer Helikalmuskulatur. Abb. 8 illustriert die Lage der unterschiedlichen Muskeln bei hydrostatischen Skeletten und verdeutlicht die Bewegungen, die sie ermöglichen.

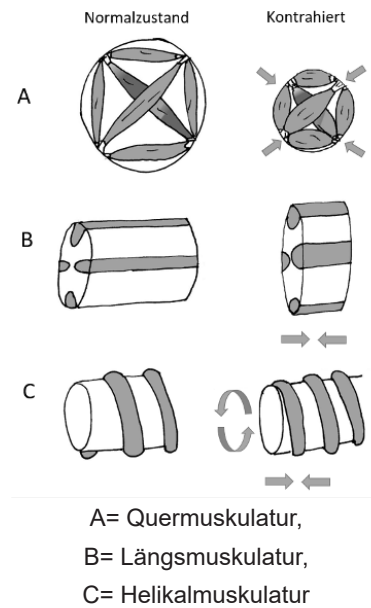


Abb. 8: Muskeln bei hydrostatischen Skeletten und die Bewegungen, die sie ermöglichen.

Funktionsweise von Bewegungen bei hydrostatischen Skeletten

Hydrostatische Skelette kann man sich wie ein muskelumspanntes Rohr vorstellen. In diesem Rohr sitzt die mit der Ummantelung verwachsene Quermuskulatur, die bei Kontraktion zu einer Verringerung des Durchmessers führt. Entlang der Längsachse dieses Rohrs befinden sich parallelliegende Stränge einer Längsmuskulatur, die teilweise in die Quermuskulatur eingebettet sind. Die Kontraktion der Längsmuskulatur führt zu einer Verkürzung des Rohrs. Generell kann beobachtet werden, dass eine Verkürzung des betroffenen Organs zu einer Vergrößerung des Durchmessers führt, wohingegen eine Verringerung des Durchmessers eine Verlängerung des Organs mit sich bringt. Die mit ihrer Bewegung einhergehende Veränderung von Länge und Durchmesser bei hydrostatischen Organen untersuchten Kier und Smith (1985) genauer. Dabei arbeiteten sie heraus, dass hydrostatische Skelette immer ein gleichbleibendes Volumen haben. Darum erfolgt bei einer Größenreduktion der einen Ebene (z. B. Länge) automatisch ein Größenzuwachs der anderen Ebene (z. B. Durchmesser).

Die mit einer Bewegung einhergehende Verformung des Organs wird durch die darin enthaltenen Flüssigkeiten verursacht. Bei einer durch die Quermuskulatur hervorgerufenen Verringerung des Durchmessers wird Druck auf die Muskelzellen der Längsmuskulatur und die darin enthaltene Flüssigkeit ausgeübt. Die Flüssigkeit in der Längsmuskulatur weicht diesem Druck aus. Dabei drückt sie gegen die Membranen der Längsmuskulatur und dehnt den Muskel in die Länge.

Bei der Kontraktion der Längsmuskulatur hingegen ziehen sich diese Zellen zusammen

und verkürzen das entsprechende Gewebe des Organs. Bei dieser Verkürzung wird die Flüssigkeit in den Zellen der Längsmuskulatur hinsichtlich der Längsausrichtung der Zelle zusammengepresst, was zu einer Verschiebung der Flüssigkeit in die Querachse der Zelle führt. Die entsprechende Zelle wird also kürzer und nimmt an Durchmesser zu. Die Vergrößerung des Durchmessers der einzelnen Längsmuskulaturbündel führt dabei zu einer Dehnung der umgebenden Quermuskulatur. Folglich nimmt der Durchmesser des verkürzten Organs zu.

Bewegungen in alle Richtungen

Lebewesen mit hydrostatischen Skeletten können sich nicht nur in die Länge dehnen und wieder verkürzen. Es ist ihnen auch möglich, um Ecken herumzugreifen, da ihnen hierfür hinderliche starre Elemente oder Gelenke, die die Bewegung vorgeben fehlen.

Ein weiterer Grund für diese Fähigkeit liegt in der schlauchartigen Anatomie der zu bewegendem Organe und der darin ringförmig angelegten Längsmuskulaturstränge. Soll beispielsweise eine Bewegung nach links erfolgen, kontrahieren nur Stränge der Längsmuskulatur auf der linken Seite des zu bewegendem Organs. Diese verkürzen sich während die rechtsseitig gelegenen Längsmuskulaturstränge gedehnt werden. Die Folge ist eine nach links abknickende Bewegung des Organs. Bei Richtungsbewegungen wirken die unterschiedlich gelegenen Fasern der Längsmuskulatur als die jeweiligen Gegenspieler.

Um eine 360°-Beweglichkeit allerdings wirklich erklären zu können, gilt zu beachten, dass entsprechende Organe bei hydrostatischen Skeletten aus einer Vielzahl (bei manchen Tieren mehrere Tausend) von aneinandergereihten und miteinander verbundenen Muskeln bestehen. Diese können unabhängig voneinander kontrahieren. Die Beweglichkeit wird darüber hinaus noch von einer weiteren Muskelgruppe, der Helikalmuskulatur, verstärkt, die sich schraubig entlang der Hauptachse des Organs befindet (Kier & Smith, 1985 320ff., Kier & Thompson, 2003, 153f.). Ein entsprechendes Organ kann somit an der einen Stelle eine Linksbewegung und an einer anderen eine Rechtsbewegung ausführen.

Beispiele aus dem Tierreich

Hydrostatische Skelette finden sich vor allem bei wirbellosen Tieren. Die komplexeste Form der Beweglichkeit in Kombination mit Präzision hat sich dabei bei den Kopffüßern (*Cephalopoden*) entwickelt. Exemplarisch hierzu soll die Muskulatur des Arms eines Oktopus Betrachtung finden. Oktopusse haben acht Fangarme, die jeweils mit mehreren Reihen an Saugnäpfen ausgestattet sind. Sie sind dazu in der Lage, ihre Arme in unterschiedliche Richtungen zu bewegen. Betrachtet man den Querschnitt eines Oktopusarms, (vgl. Abb. 9), stellt der Arm ein aus Muskeln bestehendes Rohr dar, in dessen Zentrum sich ein reich verzweigter Nervenstrang befindet. Dieser gibt Impulse an verschiedene Muskelgruppen des Oktopusarms, woraufhin diese kontrahieren (Kier & Thompson, 2003, 150-154).

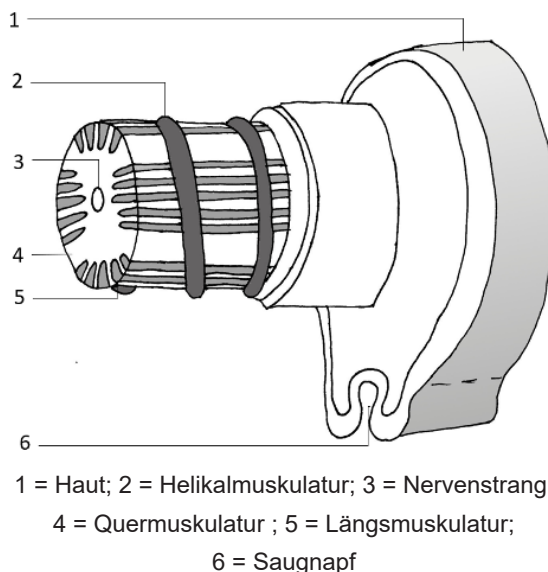


Abb. 9: Querschnitt durch einen Oktopusarm (vereinfachte Darstellung nach Kier & Smith 1985)

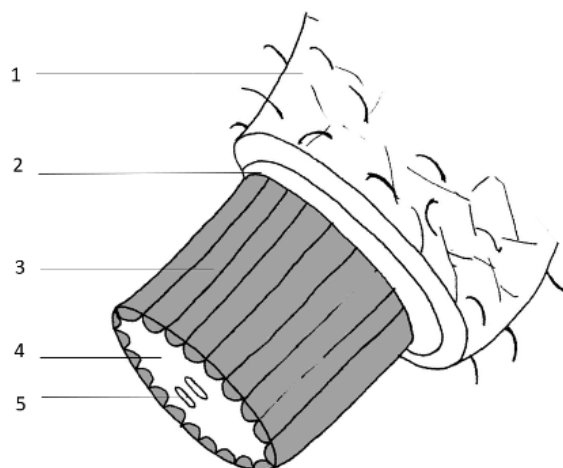
Die verschiedenen Bewegungsabläufe werden durch ein Zusammenspiel der Längsmuskulatur, der Quermuskulatur und der Helikalmuskulatur ermöglicht. Die Längsmuskulatur dient der Verkürzung und Biegung des Armes. Die Quermuskulatur kann eine Ausdehnung des Armes hervorrufen. Sowohl bei der Biegung des Armes als auch bei dessen Streckung wirkt die Helikalmuskulatur unterstützend (Kier & Thompson, 2003, 151-153).

Obwohl man hydrostatische Skelette aufgrund des Fehlens von starren Skelettstrukturen nicht bei Wirbeltieren vermuten würde, finden sich hydrostatische Organe selbst dort. Elefanten (*Elephantidae*) haben mit ihrem Rüssel einen Greifmechanismus entwickelt, der ohne Knochen und Gelenke auskommt. Der Elefantenrüssel hat sich aus einer Verwachsung der Oberlippe (*Labium superius*) und der Nase (*Rhinarium*) entwickelt und besteht ausschließlich aus Muskeln. Der Elefantenrüssel kann dabei als ein echtes Universalwerkzeug beschrieben werden. Er ist mit dem Riechorgan der Elefanten verbunden und dient der Wasseraufnahme. Elefanten können Wasser mit ihrem Rüssel ähnlich einer gigantischen Wasserspritze aufnehmen und wieder versprühen (Angermann, 2004, 663-664). In der Spitze des Rüssels münden sehr sensible Nervenenden, die es dem Elefanten ermöglichen Oberflächen genau abzutasten und selbst einzelne Grashalme und Blättchen gezielt abzuzupfen. Gleichzeitig ist der Rüssel ein so starkes Greiforgan, dass Elefanten damit Bäume ausreißen können.

Der Querschnitt durch einen Elefantenrüssel (vgl. Abb. 10) offenbart Strukturen, die der Beschreibung eines hydrostatischen Skeletts, wie nach Kier & Smith (1989, 30f.) beschrieben, entsprechen. Er ist im Grunde genommen ein muskulärer Schlauch, in dessen Inneren sich zwei hohle Rohre befinden, durch die der Elefant atmen oder Wasser aufsaugen kann.

Diese beiden Hohlrohre sind von 40.000 Muskeln umgeben. Elefanten besitzen verschiedene Stränge an Längsmuskulatur, die sich parallel entlang des Rüssels durchziehen. Außerdem ist bei ihnen auch eine Quermuskulatur vorhanden (Kier & Smith, 1989, 30). Das Wechselspiel aus Längs- und Quermuskulatur ermöglicht dabei ein Strecken und Heranziehen des Rüssels, während eine richtungsverändernde Bewegung durch ein gezieltes Anspannen der Längsmuskulatur ermöglicht wird.

Das Fehlen von starren Elementen sowie die Vielzahl der Muskeln im Elefantenrüssel und deren komplexes Zusammenspiel ermöglichen dem Elefantenrüssel eine 360°-Beweglichkeit.



1 = Haut; 2 = Bindegewebe; 3 = Längsmuskulatur;
4 = Quermuskulatur ; 5 = Nasenlöcher

Abb. 10: Querschnitt durch einen Elefantenrüssel
(vereinfachte Darstellung nach Kier & Smith 1989)

Literatur

Angermann, R. (2004). *Spezielle Zoologie* (1. Aufl.). Heidelberg, Berlin: Spektrum, Akad. Verl.

Bauer, T., & Dettner, K. (1999). *Lehrbuch der Entomologie* (1. Aufl.). Stuttgart: Fischer.

Campbell, N. A., Reece, J. B., Held, A., & Markl, J. (2003). **Biologie** (6. Aufl.). *Spektrum Lehrbuch*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verl.

Kier, W. M., & Smith, K. K. (1985). *Tongues, tentacles and trunks: the biomechanics of movements in muscular hydrostats*. *Zoological Journal of the Linnean Society*. (83), 307–324.

Kier, W. M., & Smith, K. K. (1989). *Trunks, tongues, and Tentacles: Moving with Sceletons of Muscle*. *American Scientist*, pp. 28–35.

Kier, W. M., & Thompson, J. T. (2003). *Muscle arrangement, function and specialization in recent coleoids*. *Berliner Paläobiol. Abh.* 141–162. (3), 141–162.

Müller, W., & Frings, S. (2004). *Tier- und Humanphysiologie: Eine Einführung ; mit 14 Tabellen* (2., überarb. und erw. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Berlin: Springer.

Sadava, D., Hillis D.M., Heller, H. C., & Berenbaum, M. R. (2011). *Biologie* (9. Aufl.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Sakes, A., van der Wiel, M., Henselmans, P. W. J., van Leeuwen, J. L., Dodou, D., & Breedveld, P. (2016). *Shooting Mechanisms in Nature: A Systematic Review*. *PloS One*, 11(7), e0158277. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158277>

Storch, V. und Welsch, U. (2003). *Systematische Zoologie* (6th). *Spektrum Lehrbuch*. München: Spektrum Akademischer Verlag.

Weitzel, H. (2014). *Beweglich sein*. *Unterricht Biologie*.